



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**

**GRUPO DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ESTADO DE LA TÉCNICA Y  
ESTUDIOS EXPERIMENTALES EN  
MICROGENERACIÓN**

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: ESPECIALIDAD  
ELECTRÓNICA INDUSTRIAL**

**AUTOR: OLIVER GARRIDO DIAZ**

**DIRECTOR: ANDRÉS BARRADO BAUTISTA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi tutor Andrés Barrado la ayuda e interés mostrado durante la realización de este proyecto.

Oliver Garrido Díaz.

**ÍNDICE.**

1. OBJETIVOS.....	4
2. ESTADO DE LA TÉCNICA.	
2.1 Introducción.....	5
2.2 Obtención de energía.....	5
2.3 Partes de un microgenerador.....	10
2.4 Clasificación de microgeneradores.....	14
2.4.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.	
2.4.1.1 La radiación del Sol.....	15
2.4.1.2 Principio de funcionamiento: el efecto fotoeléctrico.....	15
2.4.1.3 La célula solar.....	17
2.4.1.4 Aplicaciones comerciales.....	19
2.4.1.5 Conclusiones.....	28
2.4.2 SISTEMAS TERMOELÉCTRICOS.	
2.4.2.1 Introducción. El efecto Seebeck.....	29
2.4.2.2 Célula de calor: composición y funcionamiento.....	30
2.4.2.3 Fabricación.....	33
2.4.2.4 Proyectos y ejemplos de aplicación práctica.....	33
2.4.2.5 Conclusiones.....	37
2.4.3 SISTEMAS QUÍMICOS.	
2.4.3.1 Introducción. Microgeneradores químicos.....	38
2.4.3.2 Célula de metanol	
2.4.3.2.1 Composición y funcionamiento.....	39
2.4.3.2.2 Resultados experimentales.....	40
2.4.3.2.3 Fabricación.....	41
2.4.3.3 Célula de hidrógeno: composición, funcionamiento y resultados.....	43
2.4.3.4 Aplicaciones y proyectos.....	47
2.4.3.5 Conclusiones.....	52

2.4.3.6	Electricidad a partir de agua.	
2.4.3.6.1	Principio de funcionamiento. ....	53
2.4.3.6.2	Resultados obtenidos. ....	54
2.4.3.6.3	Fabricación. ....	58
2.4.3.6.4	Aplicaciones prácticas. ....	59
2.4.3.6.5	Conclusiones. ....	60
2.4.3.7	Electricidad mediante glucosa.	
2.4.3.7.1	Introducción. ....	61
2.4.3.7.2	Principio de funcionamiento. ....	61
2.4.3.7.3	Resultados obtenidos. ....	63
2.4.3.7.4	Fabricación. ....	64
2.4.3.7.5	Aplicaciones. ....	65
2.4.3.7.6	Conclusiones. ....	66
2.4.3.8	Electricidad mediante orina.	
2.4.3.8.1	Introducción. ....	67
2.4.3.8.2	Composición y principio de funcionamiento. . .	67
2.4.3.8.3	Resultados obtenidos. ....	68
2.4.3.8.4	Fabricación. ....	69
2.4.3.8.5	Conclusiones. ....	71
2.4.4	SISTEMAS ELECTROMAGNÉTICOS.	
2.4.4.1	Introducción. Electricidad por inducción magnética. ....	72
2.4.4.2	Composición y funcionamiento de una dinamo. ....	73
2.4.4.3	Sistemas comerciales y proyectos. ....	74
2.4.4.4	Conclusiones. ....	93
2.4.5	SISTEMAS ELECTROSTÁTICOS.	
2.4.5.1	Introducción. ....	94
2.4.5.2	Principio de funcionamiento. ....	94
2.4.5.3	Proyectos y aplicaciones de microgeneradores electrostáticos. ....	98
2.4.5.3	Conclusiones. ....	105
2.4.6	SISTEMAS PIEZOELÉCTRICOS.	
2.4.6.1	Introducción. ....	106

2.4.6.2 El efecto piezoeléctrico: funcionamiento y materiales. . .	106
2.4.6.3 Aplicaciones y proyectos. . . . .	111
2.4.6.4 Conclusiones. . . . .	132
 2.5 COMPARATIVA DE MICROGENERADORES. . . . .	 133
 2.6 ESTUDIO SOBRE ALIMENTACIÓN DE SISTEMAS MÉDICOS.	
2.6.1 Necesidades del sistema. . . . .	136
2.6.2 Métodos de alimentación. . . . .	137
2.6.3 Conclusiones. . . . .	143
 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE SISTEMAS MICROGENERADORES.	
3.1 Sistema piezoeléctrico. . . . .	145
3.2 Sistema magnético. . . . .	153
3.3 Módulo solar. . . . .	156
3.4 Conclusiones. . . . .	158
 4. PRESUPUESTO	
4.1 Costes de material. . . . .	160
4.2 Costes de desarrollo. . . . .	160
4.3 Presupuesto. . . . .	161
 5. CONCLUSIONES. . . . .	 162
 6. TRABAJOS FUTUROS. . . . .	 164
 7. REFERENCIAS. . . . .	 165
 8. LISTA DE FIGURAS Y TABLAS. . . . .	 171

### **1. OBJETIVOS.**

Este proyecto se centra en el estudio de sistemas de alimentación para aplicaciones de bajo consumo, con la capacidad de aprovechar energías de diferente índole y transformarla en electricidad de muy baja potencia, generalmente del orden de microvatios. Estos sistemas recavan energía eléctrica a partir de fuentes como la luz solar, esfuerzos, movimientos, reacciones químicas, etc. Parte de la energía disponible en diferentes ámbitos es transformada en energía eléctrica, cuyos niveles de tensión y corriente son posteriormente tratados para adecuarlos a los del sistema electrónico que va a ser alimentado. Son por tanto sistemas totalmente autónomos, con un objetivo muy específico.

Existen en la actualidad dispositivos de este tipo comercializados por algunas empresas, con aplicaciones muy variadas, aunque su utilización está, por lo general, más centrada en la experimentación y análisis de sus posibilidades. Por otro lado, el aumento de aparatos de bajo consumo, generalmente portátiles, se ha producido en gran medida gracias a su pequeño tamaño, peso, portabilidad y bajo coste entre otras características. Esto confiere un amplio abanico de posibilidades de integración para estos pequeños generadores. El propósito básico de este texto es dar a conocer estos sistemas, así como sus campos principales de aplicación para un posible desarrollo, por que no, de futuros proyectos de investigación y desarrollo de dispositivos comerciales a disposición de la comunidad. En este texto se estudian los diferentes tipos, sus características y propiedades, además de estudiar algunas aplicaciones y exponer brevemente otras tantas, abriendo así una puerta a nuevas ideas en su utilización. Para finalizar se analizan las capacidades de uno de estos sistemas, llevando a cabo el montaje y experimentación del mismo junto a su estudio económico y presupuesto.

## **2. ESTADO DE LA TÉCNICA.**

### **2.1 Introducción.**

En el título de este proyecto se hace referencia a la palabra “microgenerador”. Ciertamente no existe una definición clara que marque los límites a la hora de tildar a un sistema con este apelativo. En el caso de este proyecto se refiere, con ciertas excepciones, a dispositivos capaces de obtener cantidades de energía eléctrica en un rango de potencias desde microvatios hasta unidades de vatio a partir de energías generalmente no aprovechadas, como la luz solar, movimientos de una persona, animal o cosa, esfuerzos ejercidos sobre una superficie (zapatos, pulsación de botones), vibraciones y sacudidas, calor, etc, con el fin de alimentar sistemas electrónicos de bajo consumo con funciones muy diversas.

La física de estos sistemas es bien conocida desde hace muchos años, y su aplicación en determinados campos data de varias décadas atrás. No obstante, su uso como generadores de bajo nivel es bastante reciente, ya que su desarrollo viene influenciado a su vez por el desarrollo de la electrónica de bajo consumo. Dejando de lado otros problemas, como pueden ser la capacidad de integración en cuanto a espacio, peso o niveles de potencia, sin chips capaces de trabajar a niveles de incluso decenas de microvatio sería muy difícil encontrar ámbitos de utilización para estos dispositivos.

Haciendo referencia a las excepciones anteriormente mencionadas, hay algunos casos descritos en este texto en que la potencia generada puede salirse del rango marcado en el primer párrafo. Sin embargo se han añadido estos ejemplos por otras de sus características que cumplen con determinados objetivos aquí buscados. Propiedades como su portabilidad (sea el caso de ordenadores portátiles) o su trabajo en zonas remotas o inaccesibles, donde no es viable llevar la red eléctrica (campos de cultivo, estructuras de edificios, determinados puntos en carreteras, hábitats de animales salvajes, etc). En estos ambientes es posible recavar energía del Sol, esfuerzos o vibraciones para alimentar, entre otras posibilidades, redes de sensores que midan temperatura, humedad o número de vehículos.

Tal como se ha visto, estos ingenios vienen muy bien allí donde no hay posibilidad de tener enchufes. Sin embargo también pueden utilizarse en aplicaciones caseras o industriales, donde podemos evitar la utilización de muchos metros de cable o el uso de pilas, siendo este último caso de gran importancia dado su alto poder contaminante.

### **2.2 Obtención de energía.**

Siempre han existido múltiples fuentes de donde recavar energía residual en pequeñas cantidades, aunque las técnicas utilizadas para ello sean relativamente recientes. Actualmente se investigan con énfasis dado el potencial de futuro en sistemas portátiles, de forma que reduzcan el consumo de pilas o incluso las sustituyan, como es el caso de las células de combustible. Estos elementos generan electricidad con solo añadirles un

## Estado de la técnica.

determinado combustible, el cual puede ser fácilmente transportado para rellenar la célula en posteriores ocasiones.

La luz solar es una fuente de energía global para todos los organismos vivos del planeta. También desde hace décadas se viene utilizando para generación de electricidad en plantas solares y para sistemas autónomos (satélites), gracias sobre todo a su buena densidad de potencia. La energía solar es, al contrario que los combustibles, gratuita y muy ventajosa en ciertas aplicaciones. Lo mismo ocurre con los sistemas que obtienen energía eléctrica a partir de las diferencias de temperatura, a pesar de su menor capacidad de alimentación.

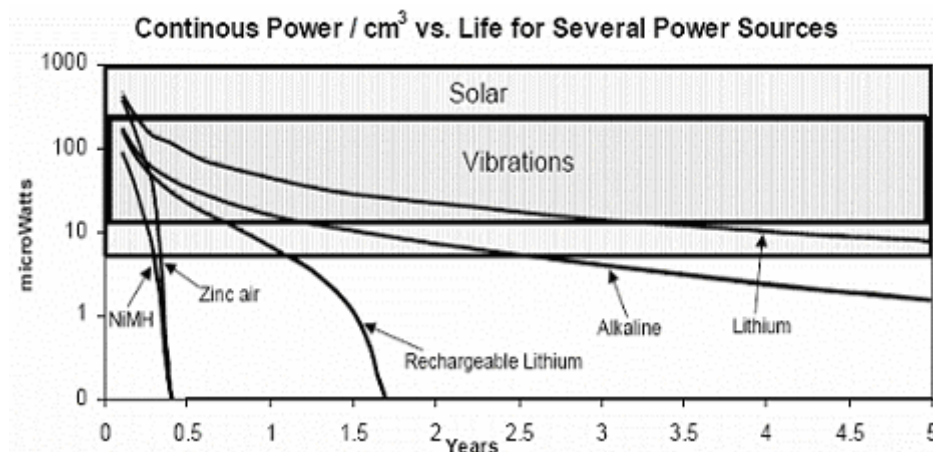


Fig. 1. Gráfico de potencia y duración de vida para fuentes y reservas de energía.

Por otra parte está el extenso campo de las vibraciones (energía mecánica), las cuales se producen a partir de un sin fin de medios. Este campo es actualmente uno de los más estudiados debido a que vivimos rodeados de ellas, lo que las convierte en una fuente totalmente renovable, gratuita y de bastante capacidad para alimentar pequeños dispositivos.

Existen básicamente tres formas de conversión de esta energía: electromagnética, electrostática y piezoeléctrica.

Tipo	Energía
Electromagnética	4mJ/cm <sup>3</sup>
Electrostática	4mJ/cm <sup>3</sup>
Piezoeléctrica	17.7mJ/cm <sup>3</sup>

Tabla 1. Estimación de energía para los tres métodos de conversión.



<b>Fuente de la vibración</b>	<b>Pico de aceleración (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Pico de frecuencia (Hz)</b>
Base de una máquina herramienta	10	70
Batidora	6,4	121
Secadora de ropa	3,5	121
Cerco de una puerta	3	125
Pequeño microondas	2,25	121
Respiradero de aire acondicionado	0,2-1,5	60
Suelo de madera con gente andando	1,3	385
Panificadora	1,03	121
Ventana exterior cercana a una calle bulliciosa	0,7	100
Ordenador con lector de CD funcionando	0,6	75
Lavadora	0,5	109
Segunda planta de un edificio de oficinas con suelo de madera	0,2	100
Frigorífico	0,1	240

Tabla 2. Posibles fuentes con sus aceleraciones y frecuencias conseguidas [58].

Generalmente las vibraciones mecánicas están repartidas en el espectro de frecuencia por debajo de unos pocos cientos de hertzios. Suelen tener su primer máximo por debajo de los 200 Hz [58]. Este aspecto es de vital importancia para hacer que el sistema generador obtenga su frecuencia de resonancia y, por tanto, la máxima obtención de energía a la frecuencia más importante del sistema donde va montado. Un inconveniente a partir de ciertas frecuencias es la aparición de amortiguamientos en el sistema que producen pérdidas en el rendimiento global. Esto obliga a optimizar los materiales que forman el conjunto.

En la figura 2 se presentan los espectros de frecuencia en función del desplazamiento y la aceleración para dos sistemas que producen vibraciones al funcionar. Como puede observarse, los mayores picos se producen a frecuencias entre 50 y 150 Hz, siendo máximos el desplazamiento y la aceleración en dicho intervalo.

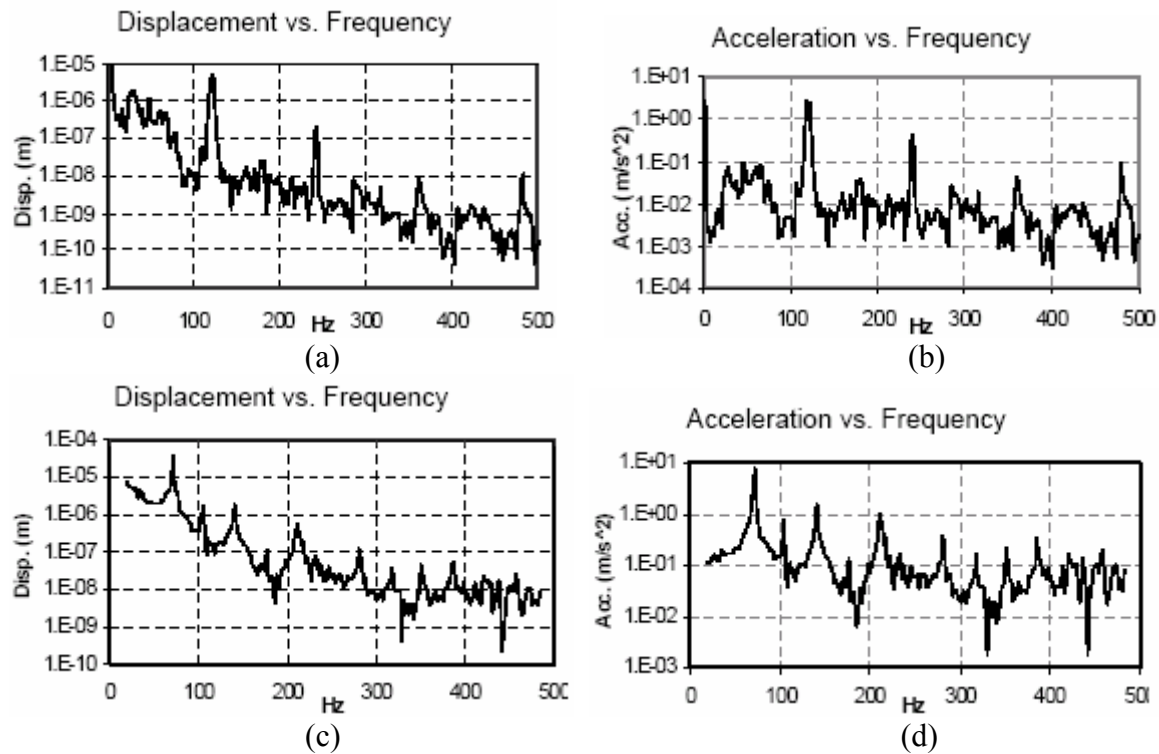


Fig. 2. Espectros de frecuencia con el desplazamiento y la aceleración: en la carcasa de un microondas (a y b) y en la base de una máquina de moler (c y d).

Actividad	Energía mecánica generada	Potencia eléctrica disponible	Energía eléctrica disponible por movimiento
Circulación sanguínea	0,93 W	0,37 W <sup>(1)</sup>	0,37 J
Exhalación	1 W	0,4 W <sup>(2)</sup>	2,4 J
Respiración	0,83 W	0,091 <sup>(3)</sup> - 0,42 <sup>(1)</sup> W	0,5- 2,5 J
Miembros superiores	3 W	0,33 <sup>(3)</sup> - 1,5 <sup>(1)</sup> W	1,5-6,7 J
Escribir a máquina	6,9-19 mW	0,76 <sup>(3)</sup> -2,1 <sup>(3)</sup> mW	143-266 $\mu$ J
Caminar	67 W	5 <sup>(3)</sup> - 8,4 <sup>(4)</sup> W	8,3-14 J

(1) generador mecánico al 50% de eficiencia; (2) turbina + generador al 40% de eficiencia; (3) generador piezoeléctrico al 11% de eficiencia; (4) generador mecánico al 12,5% de eficiencia incluyendo pérdidas en la conversión mecánica.

Tabla 3. Estimación de energía para algunas actividades del cuerpo humano [7].

La expresión matemática que expresa la máxima potencia que podemos obtener de un sistema vibracional es la siguiente:

$$P_{av} = \frac{m\xi_E \omega^2 \omega_n \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 Y^2}{\left[2\xi_T \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2 + \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2} \quad (1)$$

donde  $m$  es la masa oscilante,  $\zeta_e$  es la proporción de amortiguación eléctrica,  $\omega_n$  es la frecuencia natural del oscilador,  $\omega$  es la frecuencia de oscilación en funcionamiento,  $Y$  es la amplitud de las vibraciones y  $\zeta_T$  es la suma de las amortiguaciones eléctrica y mecánica ( $\zeta_T = \zeta_e + \zeta_m$ ).

Como se dijo anteriormente, la potencia convertida es máxima cuando la frecuencia de las vibraciones alcanza la frecuencia natural del oscilador (cuando  $\omega$  es igual a  $\omega_n$ ). En este momento se dice que el oscilador esta en resonancia. Por ello la ecuación (1) puede reescribirse de la siguiente manera:

$$P_{av} = \frac{m\xi_E Y^2 \omega^3}{4\xi_T^2} \xrightarrow{A=\omega^2 Y} \frac{m\xi_E A^2}{4\omega \xi_T^2} \quad (2)$$

Esta última ecuación (2) es la consecuencia de poner la aceleración a la que se ve sometido el sistema en función de la frecuencia y la amplitud producida. Puede deducirse que la potencia convertida aumenta linealmente con la masa oscilante ( $m$ ). Esto implica, en principio, que en nuestro diseño hemos de emplear una masa grande para producir mayores deformaciones, siempre y cuando no se produzcan problemas mecánicos ni deformaciones plásticas de los elementos. Pero en realidad, la elección de la masa es un factor más crítico, ya que reduce el nivel de frecuencia natural de un oscilador. Como puede verse en la fórmula de la parte derecha, la potencia aumenta cuando disminuye la frecuencia de vibración externa. De esta forma, hay que ajustar la masa para que la frecuencia natural se iguale lo más posible a la de vibración que aprovechamos. De esta manera se maximiza la potencia.

En segundo lugar la potencia convertida aumenta precisamente con el cuadrado de la aceleración generada en la base. Debido a que las mayores aceleraciones se encuentran a bajas frecuencias, hemos de tener en cuenta este aspecto para que el sistema resuene a la frecuencia fundamental de vibración. En último lugar, la potencia es máxima cuando la proporción de amortiguamiento mecánico es mínima e igual a la proporción de amortiguamiento eléctrico ( $\zeta_e = \zeta_m$ ).

### 2.3 Partes de un microgenerador.

Aunque la conformación del conjunto varía en función de algunos parámetros, un sistema microgenerador completo suele tener los siguientes elementos:

- **Elemento generador:** es el elemento encargado de transformar la energía primaria en energía eléctrica. Por el orden seguido en el índice, estos serían: la célula solar o fotovoltaica, la célula de calor o de efecto Seebeck, la célula de combustible, la dinamo o solenoide con imán, el condensador variable, y por último, el elemento de material piezoeléctrico.

- Los sistemas microgeneradores necesitan generalmente **elementos de almacenaje** para la energía, ya que la obtención de ésta no se hace de forma continuada y su uso se realiza casi siempre en momentos muy determinados. Debido a la, en muchos casos, escasa energía recavada, los elementos de almacenamiento más utilizados son condensadores y/o pequeñas baterías recargables (suelen ser de NiCd o Ión-Litio principalmente).

- Todo sistema generador lleva consigo una electrónica de acondicionamiento de la energía. Para alimentar pequeños sistemas electrónicos nos interesa una salida de corriente continua. Si el elemento generador ofrece una salida alterna (caso de los materiales piezoeléctricos, sistemas electrostáticos y algunos magnéticos), hemos de rectificarla previamente mediante un **punto de diodos** y un **filtro** en su salida (etapa de rectificación). Es de vital importancia usar diodos de bajas pérdidas (baja tensión en directa  $V_F$ ), utilizados en baja señal o tipo Schottky, para utilizar la menor cantidad de energía posible en polarizarlos.

- Generalmente hay que regular y modificar el nivel de tensión a la salida del rectificador (en caso de tenerlo) para adecuarlo al que va a utilizar el dispositivo electrónico que alimentamos. Para ello se utilizan reguladores de tensión de salida, pudiendo ser lineales o conmutados. Los primeros son más sencillos, ya que utilizan básicamente un diodo zéner para fijar la tensión a la salida. En la figura 3 se muestran dos sencillos modelos de reguladores lineales discretos, aunque hoy día existen reguladores de este tipo integrados en un chip.

En el caso de la figura 3(a) se mantiene constante la corriente por la carga, siendo el zéner el que absorbe el exceso de corriente. En el caso (b) la corriente es regulada por el transistor, el cual depende de la tensión en  $R_v$ . Al aumentar la tensión en  $R_v$ , el transistor conduce menos al aumentar su tensión  $V_{cb}$ , regulándose la corriente por él al circular el exceso por  $R_v$ .

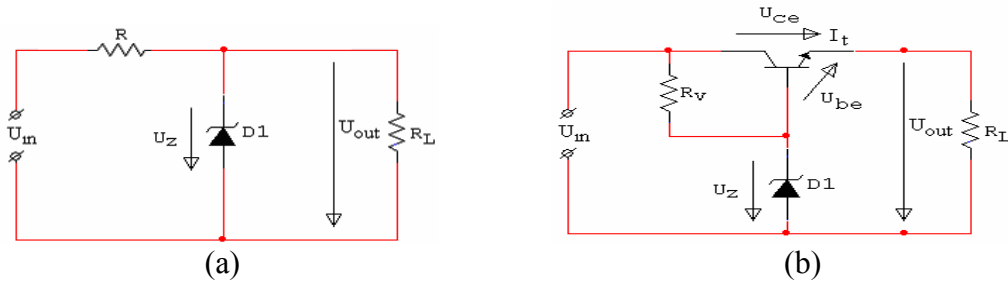


Fig. 3. Reguladores lineales: (a) regulador con zéner en paralelo con la carga; (b) regulador con transistor en serie con la carga.

Los reguladores lineales dan buen resultado en aplicaciones donde no es necesario un control sobre el ciclo de trabajo. Sin embargo tienen un rendimiento menor que los conmutados, ya que estos últimos tienen un transistor funcionando en conmutación, reduciéndose la energía disipada en ellos y el tamaño de los disipadores en caso de corrientes elevadas. En el caso de los lineales, es el elemento regulador el que absorbe el exceso de potencia, lo que provoca una mayor disipación de calor y menor rendimiento. Por eso su uso suele restringirse a aplicaciones de baja potencia, preferiblemente de menos de 5W.

Existen varias topologías de reguladores conmutados, interesándonos básicamente dos de ellas: topología reductora de tensión (buck) o topología elevadora (boost). Ambas topologías utilizan los mismos elementos, variando la disposición de estos para funcionar de una u otra forma. Para este tipo de sistemas y con el fin de reducir el número de componentes y pérdidas se utilizan chips que integran todos los componentes necesarios para convertir el nivel de tensión.

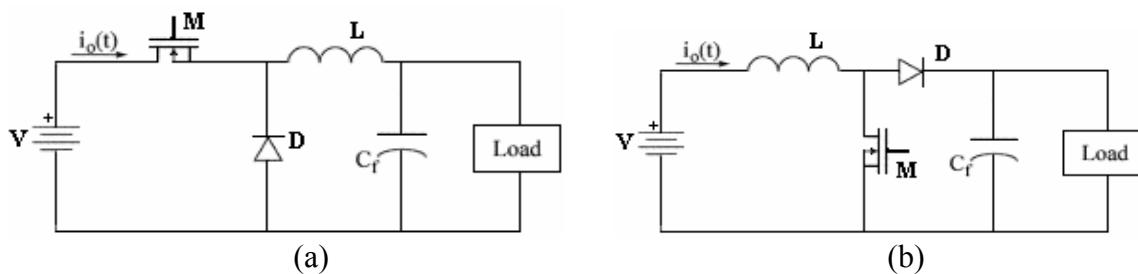


Fig. 4. Convertidores continua-continua conmutados: (a) reductor; (b) elevador.

Como puede verse, los componentes que forman estos convertidores son: un transistor para permitir o no el paso de corriente (control del ciclo de trabajo), un diodo de libre circulación para permitir la descarga de la bobina y un condensador. El conjunto bobina-condensador forma un filtro LC para eliminar los armónicos de la tensión de salida. El sistema lleva incluida la electrónica necesaria para el control del transistor, pudiendo hacerse por varios métodos. Como ya se dijo, el rendimiento de estos convertidores es mayor que en los lineales debido al menor consumo y disipación en los

elementos de control. Por otra parte, el tener más componentes implica un diseño más complejo y menos robusto.

En la figura 5 pueden verse dos disposiciones diferentes de los componentes de un microgenerador. Los bloques con líneas discontinuas pueden suprimirse en función de la naturaleza de la corriente y de la utilización de la energía.

En primer lugar tenemos un factor clave: la naturaleza del generador. En función de esta naturaleza (solar, magnética, etc) dependerá la capacidad propia para recavar energía y el lugar donde podremos implantarlo. Por ello se debe hacer un estudio con el fin de averiguar que elemento generador podemos aplicar en cada caso. Debido a esta limitación tenemos restricciones en el número de aplicaciones que podemos hacer. La primera etapa (generación) y la carga que queremos alimentar son por tanto los factores que determinan el resto de componentes que forman el microgenerador.

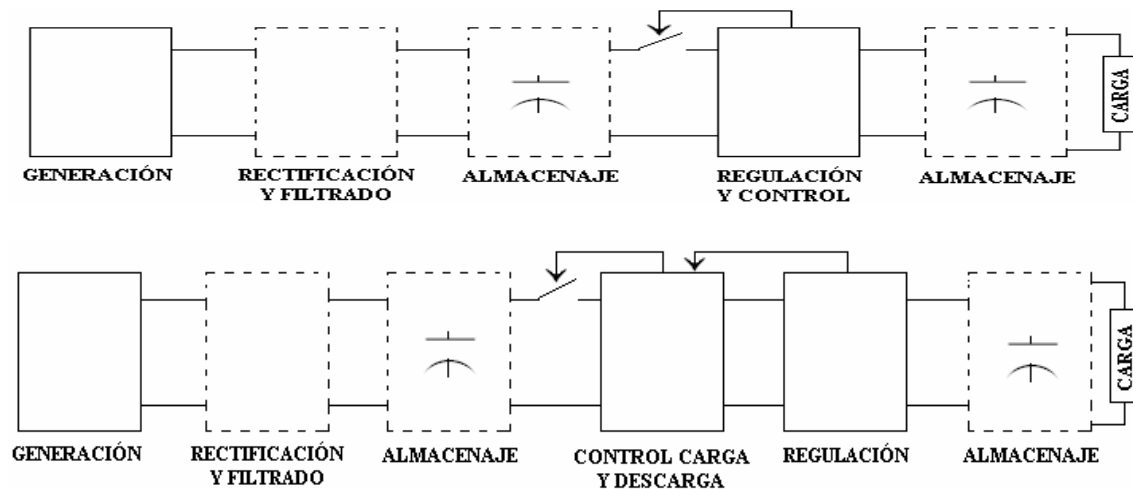


Fig. 5. Diagrama de bloques de las distintas etapas en dos topologías diferentes.

La etapa de rectificación puede suprimirse si la salida que ofrece la etapa de generación es continua, caso de las placas solares, los módulos térmicos y las células de combustible. Por otro lado, la etapa de regulación/conversión de la tensión suele ser necesaria casi siempre, ya que el generador pocas veces ofrece una salida con los niveles de tensión y corriente deseados. Esta etapa de regulación conlleva un control de la carga de los elementos de almacenamiento.

Básicamente se pueden tener dos, una o ninguna etapa de almacenamiento, siendo esta última opción utilizada únicamente en algunas células de combustible, debido a que se diseñan para un nivel de salida establecido. En el caso de aplicaciones como una lámpara de jardín se tiene una única etapa de almacenamiento tras la generación. Toda la energía recavada es inmediatamente almacenada en una batería de cierta capacidad para su uso nocturno. Llegado el momento se transforma la energía a los niveles adecuados de tensión y corriente para alimentar un diodo LED.

Otros sistemas disponen también de una única etapa de almacenamiento, aunque su funcionamiento es completamente diferente. Si lo que queremos es tomar medidas de temperatura cada cierto tiempo y enviarlas mediante radiofrecuencia a un receptor,

necesitaremos una batería antes de la etapa de regulación. Un circuito de control ordenará la descarga de la batería cuando ésta alcance un cierto nivel de carga, y deshabilitará la descarga cuando el nivel de salida del regulador se reduzca hasta un nivel marcado. De esta forma realizaremos las operaciones de tomar la muestra, digitalizarla, codificarla y enviarla en una sola fase. Después habrá que esperar a que el sistema generador almacene suficiente energía para realizar de nuevo toda la operación. En este aspecto dependemos completamente del sistema generador y de la cantidad de energía exterior de que disponemos. Si el medidor de temperatura se instala en un zapato o en un motor, que son sistemas que proporcionan gran cantidad de energía tanto en amplitud como en frecuencia, podremos tomar medidas de temperatura cada menos tiempo. Si aprovechamos en cambio las vibraciones de un edificio para sustentar el sensor necesitaremos más tiempo para conseguir el nivel adecuado de carga, y por tanto tomaremos menos muestras.

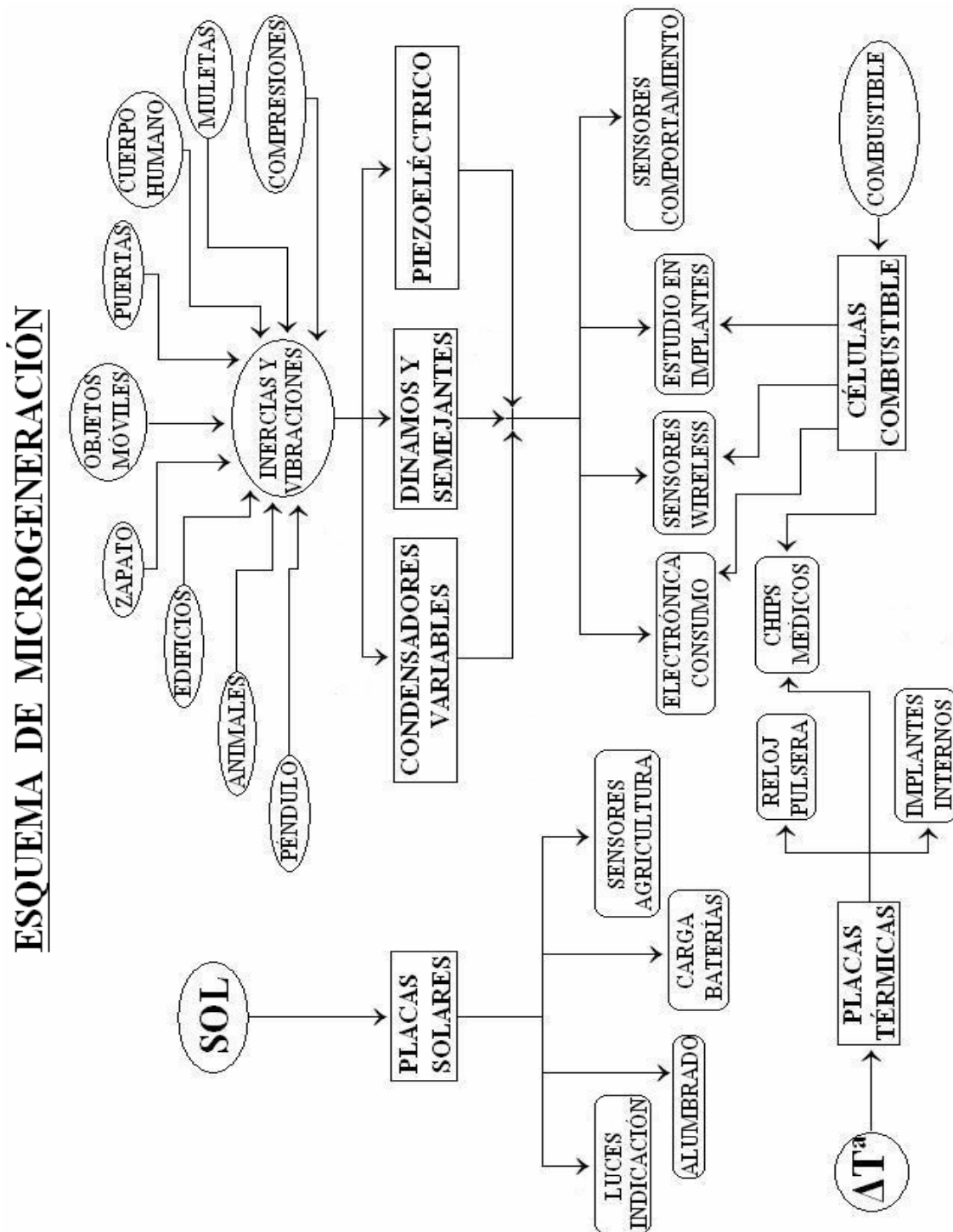
En el caso de tener un cargador de baterías podemos tener una o dos etapas según su funcionamiento. En caso de recavar continuamente energía durante un cierto período de tiempo solo necesitaremos una fase de almacenamiento tras la generación o tras la regulación. Si por el contrario recavamos de forma discontinua, necesitaremos dos etapas para asegurar la carga final en el momento adecuado.

Como ya se dijo anteriormente, debemos saber que queremos alimentar y que consumo va a tener dicho elemento, ya que así determinaremos la disposición más adecuada para cada caso. La cantidad de sistemas a alimentar varía en función de la energía que necesitan para funcionar, aunque cada vez más se consigue reducir gracias al desarrollo de la electrónica en este aspecto. En la tabla 4 puede verse una aproximación de la energía y potencia que se necesita para realizar ciertas tareas, como la de sensado o transmisión y recepción de señales, incluyéndose además el tiempo que dura aproximadamente la operación. Estas características son de gran importancia a la hora de elegir el generador a utilizar, el lugar de donde obtendremos la energía o el ciclo de trabajo del sistema.

System Requirements				Energy Harvesting Source Requirements	
	Duration	Power	Energy	Energy Source	Expected Average Power
Transmission	5 ms	5 mW	25 $\mu$ J	Electrostatic	50 $\mu$ W
Reception	5 ms	3.75 mW	18.75 $\mu$ J	Photovoltaic	50 $\mu$ W
Sensing	1 ms	10 $\mu$ W	10 nJ	Thermoelectric	15 $\mu$ W
Total	500 ms	88 $\mu$ W	44 $\mu$ J	Total Average Power Available	115 $\mu$ W
Harvesting requirement	> 440 ms	100 $\mu$ W	44 $\mu$ J	Total Available energy	57.5 $\mu$ J

Tabla 4. Requerimientos de un sistema sensor y capacidad de algunas fuentes de energía.

## 2.4 Clasificación de los microgeneradores.





## **2.4.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.**

### **2.4.1.1 La radiación del Sol.**

La radiación que llega a la superficie de la Tierra tiene básicamente 2 componentes [25]:

- Directa: aquella que no sufre desviación por la atmósfera.
- Difusa: aquella que sufre cambios de dirección por reflexión y dispersión de la luz en la atmósfera.

La radiación directa es la más importante a la hora de aprovechar la energía de la luz solar. También hay una parte de la luz con componente directa o difusa, que es reflejada o absorbida por los objetos y por los instrumentos encargados de aprovecharla.

Hay que tener en cuenta las variaciones de irradiancia debido al movimiento del Sol, la altura del lugar sobre el nivel del mar (cuanto más alto sea, mayor aprovechamiento debido a la menor dispersión), localización geográfica, clima local (dentro de una región hay zonas con mayor número de horas de Sol al año), factores meteorológicos (con cielo nublado hay menos capacidad de aprovechamiento), etc.

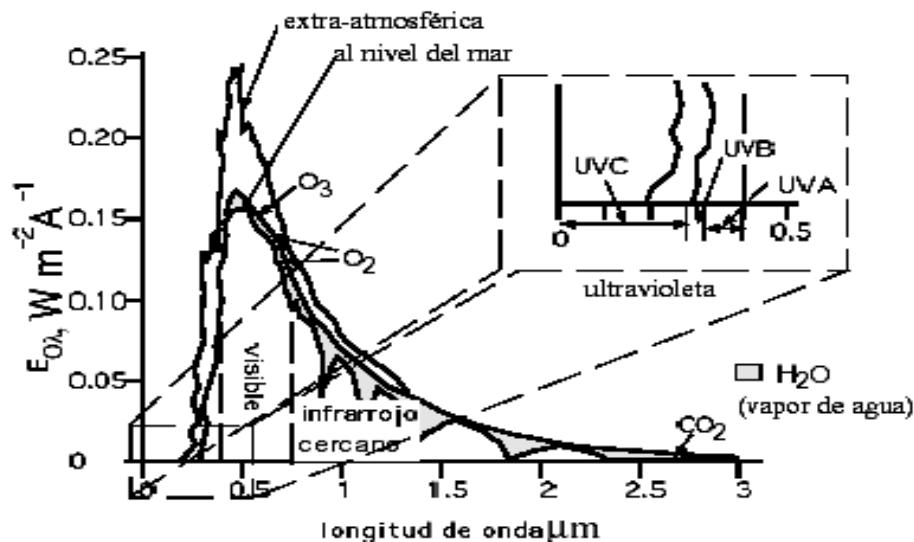


Fig. 6. Distribución de la irradiancia en el espectro solar

### **2.4.1.2 Principio de funcionamiento: el efecto fotoeléctrico.**

La hipótesis de los cuantos de acción que Max Planck publicó en 1900, explicando que un sólido emite radiación electromagnética porque contiene muchos osciladores de dimensión atómica, lo cual hace que irradien una onda electromagnética sirvió a Albert Einstein para explicar la emisión fotoeléctrica, cuyas leyes no tenían explicación por métodos clásicos. Los puntos básicos de dicha teoría son:

Un fotón choca contra un metal y es absorbido completamente, cediendo su energía  $h\nu$  a uno de los electrones libres. Para extraer este electrón del metal es preciso comunicarle cierta energía  $E$  superior a un valor umbral  $E_0$ , que depende del material de que se trate. El excedente de energía  $E-E_0$  constituye la energía cinética máxima del electrón:

$$E-E_0 = \frac{1}{2} m v_{\text{máx}}^2 \quad (3)$$

La energía  $E$  se suministra por medio del fotón, portador del cuanto de energía  $h$ . Por tanto,

$$h\nu = E_0 + \frac{1}{2} m v_{\text{máx}}^2 \quad (4)$$

que es la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico [24].  $E_0$  representa la energía mínima necesaria para liberar el electrón del material.

De acuerdo con este modelo, un aumento en la intensidad luminosa significa un mayor número de “paquetes” individuales de energía, pero la energía de cada paquete sólo varía con la frecuencia de la luz. Si la energía de cada paquete  $h\nu$ , donde  $\nu$  es la frecuencia del oscilador y  $h$  una constante universal llamada constante de Planck de valor  $6.63 \cdot 10^{-34}$  J·s, es menor que  $E_0$  no se produce el efecto fotoeléctrico aunque la radiación sea muy intensa. Por el contrario, si la radiación es muy débil, pero suficientemente energética, se producen fotoelectrones.

Los electrones emitidos por el efecto fotoeléctrico poseen realmente una energía cinética variable dentro de un intervalo de valores, ya que son arrancados del interior de la superficie de metal y antes de emerger sufren colisiones con los átomos del mismo. Los fotoelectrones de energía máxima son aquellos que se originaron muy próximos a la superficie (electrones de valencia) y, por tanto, escaparon sin ningún choque.



Fig. 7. Actuación de los fotones según su energía.

La posibilidad de producir electricidad a partir de la luz se basa en las propiedades de un tipo especial de materiales llamados semiconductores. Cuando la luz incide sobre ellos, los fotones son capaces de romper los enlaces de los electrones de valencia con el núcleo y quedar liberados. A su vez el hueco dejado por el electrón puede desplazarse libremente por el sólido. Como ya se ha dicho, no todos los fotones solares incidentes en los materiales semiconductores son capaces de generar un par electrón hueco. El movimiento dentro del sólido de los electrones y los huecos debe ser en direcciones opuestas para así generar una corriente por el circuito interno. Para que

esto pueda ser así necesitamos un campo magnético dentro del semiconductor y evitar así la recombinación interior de los electrones y los huecos. Para ello se añaden impurezas de otros átomos. En el silicio se crea una zona n (exceso de electrones) al doparlo con fósforo y una zona p (defecto de electrones) al doparlo con boro. Las grandes diferencias de concentración de electrones y huecos entre ambas regiones crean un campo magnético de la zona n a la zona p, que es el responsable de separar los electrones y los huecos extras que se producen cuando la célula es iluminada.

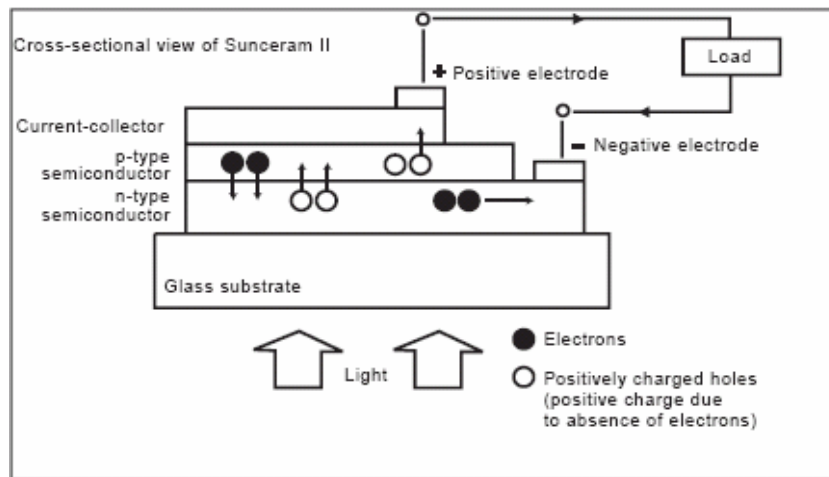


Fig. 8. Dibujo del funcionamiento básico para una placa Sunceram II de Panasonic.

### 2.4.1.3 La célula solar.

Una célula solar es un dispositivo capaz de convertir la energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica. La gran mayoría de las células solares que actualmente están disponibles en el mercado son de silicio monocristalino o policristalino. El primer tipo se encuentra más generalizado y aunque su proceso de elaboración es más complicado y caro, suele presentar mejores resultados en cuanto a su eficiencia, con rendimientos entre 15 y 17 % frente a los 12-14 % del policristalino [69]. Otro tipo de células son las de silicio amorfo hidrogenado, muy utilizadas en calculadoras y otros pequeños aparatos. Este tipo de células se depositan sobre sustratos como el vidrio, acero, polímeros, etc, teniendo mayor absorción óptica que las de silicio monocristalino. A pesar de ello, la movilidad electrónica es menor al tener mayor cantidad de defectos en su estructura. Estos defectos aumentan con la iluminación en función de su intensidad y la temperatura. Tienen un rendimiento inicial superior al 12%, aunque se reduce por los efectos de la iluminación. Son las que tienen el mejor aprovechamiento de las frecuencias del espectro visible [66].

Además de las ya mencionadas están también las células basadas en la multiunión de capas de arseniuro de galio (GaAs). Este tipo de células son muy recomendables para sistemas MEMS dado su alta capacidad de integración, ya que cada célula puede medir menos de  $150 \times 160 \times 3 \mu\text{m}^3$  [67]. Contrariamente obtienen muy bajas potencias (pocos microvatios) de salida a pesar de tensiones de incluso decenas de voltios.

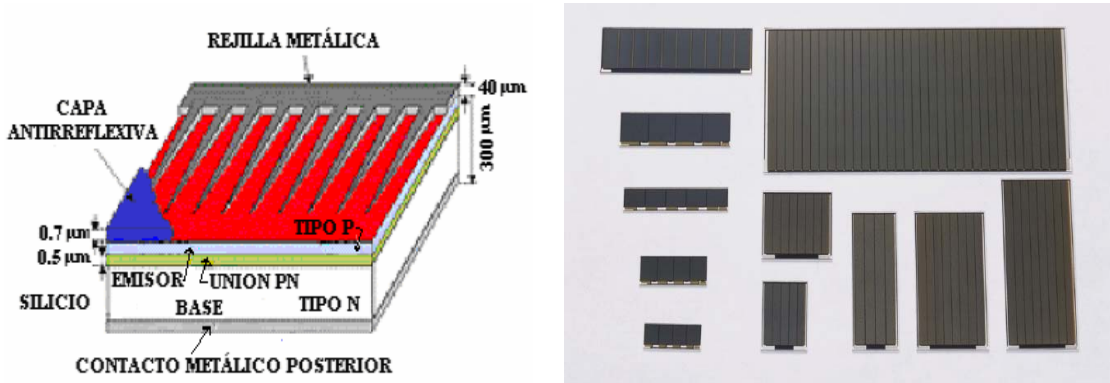


Fig. 9. Composición de una célula solar y células comerciales para microgeneración.

Por otra parte, la experimentación con materiales tales como el telururo de cadmio o el diseleniuro de indio-cobre está llevando a las células fabricadas con estas sustancias a ser utilizadas dentro de poco en aplicaciones comerciales, contándose con la ventaja de poder trabajar con tecnología de láminas delgadas.

La tecnología del silicio como material de base para la fabricación de células fotovoltaicas está sujeta a constantes variaciones, experimentando diferencias importantes según los distintos fabricantes. Algunos conceptos importantes a tener en cuenta en una célula solar son:

Punto de máxima potencia ( $P_M$ ): es el producto del valor de tensión ( $V_M$ ) e intensidad ( $I_M$ ) para los que la potencia entregada a una carga es máxima.

Factor de forma (FF): se define como el cociente de potencia máxima que se puede entregar a una carga entre el producto de la tensión de circuito abierto y la intensidad de cortocircuito, es decir:

$$FF = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (5)$$

, siendo:

$V_{oc}$ : tensión de circuito abierto, que es el máximo valor de tensión en extremos de la célula cuando no hay conectada ninguna carga.

$I_{sc}$ : intensidad de cortocircuito, definido como el máximo valor de corriente que circula por una célula fotovoltaica cuando está cortocircuitada.

El factor de forma suele tomar valores entre 0.7-0.8 para las células más habituales (silicio y arseniuro de galio).

Eficiencia de conversión energética: se define como el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede entregar a la carga y la irradiancia, entendiéndose como tal la energía solar incidente por unidad de área multiplicada por el área de la célula:

$$\eta = \frac{P_m}{E \times A_e} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{E \times A_e} \quad (6)$$

## **Sistemas fotovoltaicos.**

La influencia de la temperatura en los factores anteriores es muy importante. Al aumentar la temperatura:

- Aumenta ligeramente la intensidad de cortocircuito.
- Disminuye la tensión de circuito abierto, aprox:  $-2.3 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$
- El factor de forma disminuye.
- El rendimiento decrece.

De ahí los grandes esfuerzos por mejorar el rendimiento y el rango de longitudes de onda de las células, que reduzcan el calor generado por la radiación no aprovechada. Una célula como la Panasonic BP-376634, con unas medidas de 37 mm x 66 mm consigue una tensión en circuito abierto de 5,5 V y una salida máxima de 110 mW a pleno sol. Por la tarde (menos de 40000 Lux) se obtuvo no menos de 5 V y 25 mW, que es un 23% de la máxima obtenida a pleno sol. Para una orientación de 45 grados se obtuvo una intensidad de luz de 9000 Lux, que dio 3,4 V y 12 mW, lo que demuestra la gran dependencia de las condiciones de luz que tienen las placas fotovoltaicas.

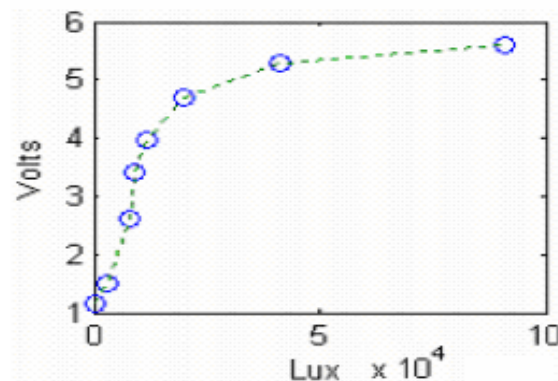
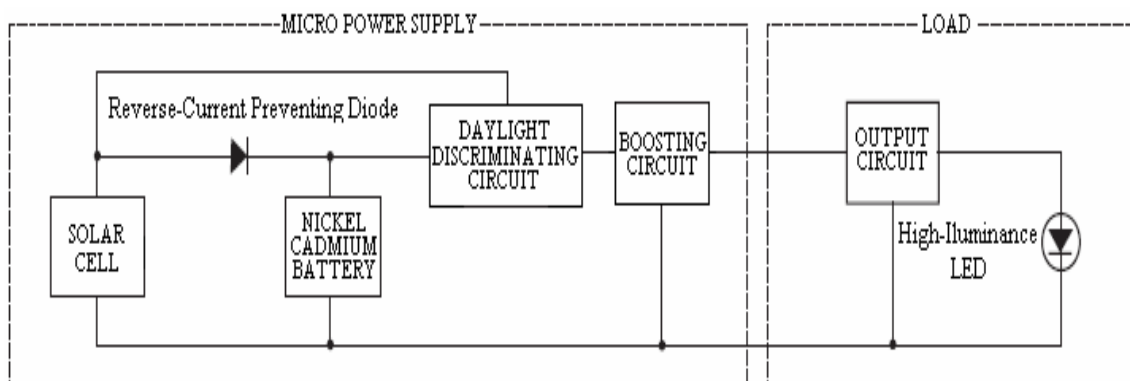


Fig. 10. Gráfico de tensión- iluminación para la célula BP-376634 de Panasonic.

### **2.4.1.4 Aplicaciones comerciales.**

Un ejemplo básico de sistema alimentado con energía solar es el presentado por Panasonic, ampliamente utilizado y comercializado. A partir de este modelo se pueden hacer modificaciones para alimentar distintos tipos de dispositivos, como microcontroladores de bajo consumo, módulos de transmisión-recepción, pequeñas alarmas, etc.



• **Main Specifications**

Unit model number	Rechargeable battery model number	Rechargeable battery nominal voltage	Rechargeable battery capacity	Solar cell model number	* Solar cell output	Lighting mode	Duty ratio	Peak current
BP-6B142UA	P-01H/1P29	1.2V	110mAh	BP-243318L	1.8V, 16.4mA	Flashing	5% (approx.)	20mA (approx.)

\* Solar light = AM 1.5, 100mW/cm<sup>2</sup>

• **Specifications**

Charging time	approx. 1 hour (clear outdoor; 70mW / cm <sup>2</sup> or more)
	approx. 10 hours (cloudy outdoor; 10mW / cm <sup>2</sup> or more)
Illuminance to trigger lighting	30 to 300 lx, outdoor light (standard design)
Lighting duration	approx. 14 hours (standard design)
Flashing cycle	approx. 1.0 second (standard design: battery voltage 1.25V)
LED	High-luminance 5φ, red (standard design)
Service temperature range	-10°C to 50°C
Weight	approx. 5g (circuit board)

Fig. 11. Sistema BP-6B142UA de Panasonic con su esquema y cuadro de características.

Como puede apreciarse en la figura 11, el sistema BP-6B142UA de Panasonic se compone de:

- Una célula solar.
- Una batería níquel-cadmio recargable.
- Diodo entre ambas para evitar dañar la placa con las descargas de la batería.
- Led de alta luminiscencia.

- Un circuito discriminador de luz. Básicamente es un interruptor mecánico. Si se quiere un funcionamiento automático se puede cambiar por una LDR (Light Dependant Resistor), cuya resistencia es muy alta al incidir la luz y muy baja cuando no hay luz. Así evitamos la descarga de la batería durante el día y provocamos el funcionamiento del sistema durante la noche.
- Un circuito elevador de tensión (conjunto de bobina, diodo, condensador electrolítico y resistencia). Otros sistemas proponen elevar la corriente por medio de una red de resistencias y un conjunto de dos transistores bipolares en topología Darlington, donde la corriente de base del segundo transistor es la corriente de colector del primer transistor, lo que implica que  $I_{C2} = \beta_2(\beta_1 + 1)I_{B1}$ , siendo esta corriente la que alimenta el led.

Se obtuvo un máximo de 1,8 V y 16,4 mA para unas medidas de la célula de 24 mm x 33 mm, 25°C de temperatura externa y una fuente de luz de 100 mW/cm<sup>2</sup> [23].

El sistema anteriormente mostrado puede ser utilizado para diferentes propósitos, como lámparas de jardín, lámparas de identificación para la noche en coches y bicicletas, balizas de carretera, señales de peligro por obras, etc, aunque el sistema puede alimentar otros receptores además de un led.



Fig. 12. (a) Indicador de posición para bicicleta; (b) Lámpara de jardín solar.

**Pequeños aparatos:** desde hace algunos años se comercializan varios tipos de pequeños sistemas alimentados por células solares, tales como calculadoras, relojes, radios, linternas, bombillas para sombrillas, indicadores del número de una casa, etc. Estas células proporcionan suficiente energía para alimentar circuitos muy sencillos durante horas.



Fig. 13. Productos alimentados con energía solar.

**Ionizador de agua en piscinas:** este sistema forma iones en el agua de una piscina mediante una corriente generada por un pequeño panel solar, que se hace



circular por un par de electrodos. Estos electrodos están uno dentro del otro, rompiendo las moléculas de agua (electrólisis) que permanece entre ellos. La producción de iones elimina posibles microorganismos y algas no deseadas mediante el movimiento de cargas en el líquido y el ataque eléctrico producido.

Debido a la ligereza del conjunto, se deja flotar en el agua de la piscina mientras se cargan las baterías con la luz solar diurna. Cuando las baterías alcanzan su nivel óptimo de carga se procede a realizar la función de desinfección. Lógicamente, el tiempo empleado para la carga depende directamente de la radiación solar.

**Llavero antimosquitos:** genera un sonido de alta frecuencia similar al zumbido de los mosquitos macho, que ahuyenta a las hembras cuando están en época de fecundación, ya que son las hembras las que pican para alimentarse. Otros sistemas funcionan emitiendo ultrasonidos.

**Extractor:** evacua el aire viciado de una habitación mediante un pequeño ventilador. Va instalado en el exterior de la casa para aprovechar más cantidad de luz y puede instalarse fácilmente en la salida del calentador de agua o de la campana extractora para retirar más rápidamente los gases.

**Cargador portátil:** los hay de varios tamaños según lo que haya que cargar (pilas, móviles, y por qué no, ordenadores portátiles). Estos cargadores tienen forma de carpeta o agenda de mano para proteger las placas y aumentar su superficie de generación.

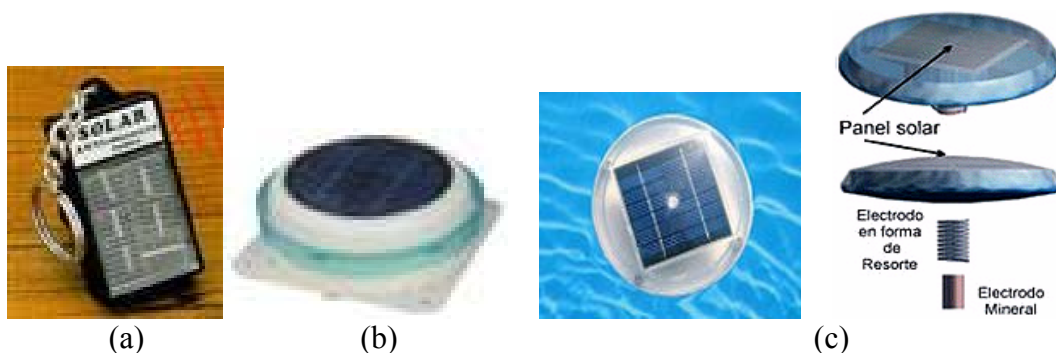


Fig. 14. (a) Llavero antimosquitos, (b) extractor de aire y (c) ionizador de agua.

**Placas empotradas:** existen fabricantes de placas de reducido tamaño, como Fadisol, cuyas placas sirven muy bien para aplicaciones como las anteriores. El modelo de panel solar 0157 de la figura 15 (superior izquierda) tiene unas medidas de 255 x 187 x 17 mm, con una potencia máxima de 4,5 W. La tensión nominal es de 12 V, tensión en circuito abierto de 18 V y una corriente máxima de 250 mA, con un precio de 57,60 euros [44]. Este tipo de panel se puede utilizar como cargador portátil de una batería, que alimente, por ejemplo, una bomba de jardín para bombear el agua de una fuente, un radar que mida la velocidad de los coches en la carretera o un cargador de móviles o de ordenadores portátiles. Fadisol también fabrica módulos más pequeños para sistemas de microgeneración.





**Modelo FS 02**  
**Panel solar 5 watts**  
**Bomba 12 v**

**Opera durante el día**  
**Chorro agua 1,20 m**  
**Flujo de agua 400**  
**litros/hora**

Fig. 15. Placas solares aplicadas como cargador y sistema de bombeo.



Fig 16. Radar de velocidad.

**Semáforo:** actualmente se utilizan bombillas a 220 voltios de red en los semáforos convencionales. Sin embargo no es necesario un elemento de tal consumo para determinar la prioridad de paso en intersecciones. A este respecto ni siquiera es necesaria una batería de diodos led, sino uno solo por bombilla. En este caso se dispondría de forma vertical para permitir el paso y horizontal para prohibirlo. Esto es así debido a que los leds iluminan sobre todo por su parte superior, pudiendo realizar la reflexión de su luz en sentido inverso para aumentar la longitud del rayo y que parezca un tubo fluorescente.

En cuanto al sistema de alimentación, los leds usarían la red durante el día a la vez que se cargan las baterías del sistema para su utilización nocturna. Para cargarlas no hace falta más que dos o tres pequeñas placas solares como las de la lámpara de jardín mostrada anteriormente (figura 12(b)), de forma que se asegure una carga de seguridad para varios días. Con una producción de unos 10 mW por placa para unas dimensiones de unos 30 mm x 30 mm se aseguraría la alimentación nocturna del sistema, incluyendo el controlador del tiempo de encendido y apagado de las luces. De esta forma se ahorraría gran cantidad de energía para una colonia de semáforos de este tipo en ciudad. El conjunto básico de alimentación nocturno para cada semáforo constaría de un elemento para desacoplar la red, un regulador de continua para adecuar el nivel de tensión, un microcontrolador de bajo consumo para el control de tiempos, así como el encendido de las luces, y un transmisor-receptor de señal de radio para comunicarse con los otros semáforos.

**Placas enrollables:** gracias a la invención de las placas solares flexibles mediante células de silicio amorfo instaladas sobre polímeros se ha conseguido introducir microgeneradores solares en prácticamente cualquier sitio, como por ejemplo en la ropa, convirtiéndonos a nosotros mismos en paneles móviles. Existen a la venta placas solares de gran superficie que se pueden enrollar para ocupar poco espacio durante su transporte, como las de la marca Brunton. La placa es enrollable y de gran rendimiento, con protección en el reverso y fabricada sobre Tefzel (fluoropolímero de alta durabilidad). Es resistente al agua y su salida máxima es de 15,4V y 600 mA para el modelo Solarrol 9 (medidas de 30,48 x 101,6 cm totalmente abierto) de la figura 17 (a), aunque existen modelos de hasta 1600 mA. El fabricante incluye como posibles aplicaciones la alimentación de teléfonos celulares, PDA's, sistemas GPS, lectores MP3, ordenadores portátiles y videocámaras digitales [68]. El mayor problema es su precio (casi 200\$ la más barata).



Fig. 17. (a) Placa enrollable de silicio amorfo; (b) Chaqueta con placas flexibles; (c) Ordenador y teléfono portátiles alimentados con placa solar enrollable.

Otro modelo de placas flexibles llamado CIGS está formado por un material semiconductor a base de cobre, indio, galio y selenio ( $\text{CuInGaSe}_2$ ). Este material es más barato que el silicio, lo que en un futuro reducirá de forma importante el precio de estos sistemas. La mejor eficiencia lograda por este material es del 19,5% hasta el momento, aunque se espera llegar al 30% en pocos años [28].

**Sistema STM 250:** hay otras empresas, como la alemana EnOcean, fabricante de varios sistemas transmisores de radiofrecuencia, cuyos productos trabajan sin baterías externas. Todos ellos son autoalimentados utilizando placas solares, sistemas electromagnéticos o elementos piezoeléctricos. Uno de ellos es el contacto magnético STM 250 alimentado por energía solar.

El contacto magnético STM 250 es un sistema que produce un código de 32 bits a 868,3 MHz y lo envía cuando su sensor magnético detecta un cambio de posición (sensor que mide variaciones de campo magnético en un imán colocado enfrente de él) o bien se pulsa el botón TI (Teach-in). En caso de no producirse cambios en el estado del sensor, se envía de todas formas una señal cada 15 minutos con el estado del sensor y del botón para indicar que el sistema funciona (señal de vida). Este sistema dispone de una placa solar de alto rendimiento, una batería, un sistema de control de la energía almacenada y consumida, un procesador que genera el código a enviar y un sistema de transmisión RF con antena. En este caso, el receptor de la señal también se alimenta con luz solar.

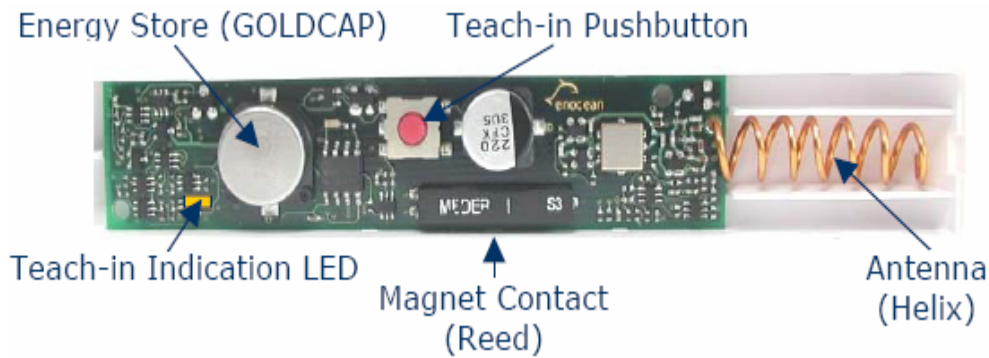
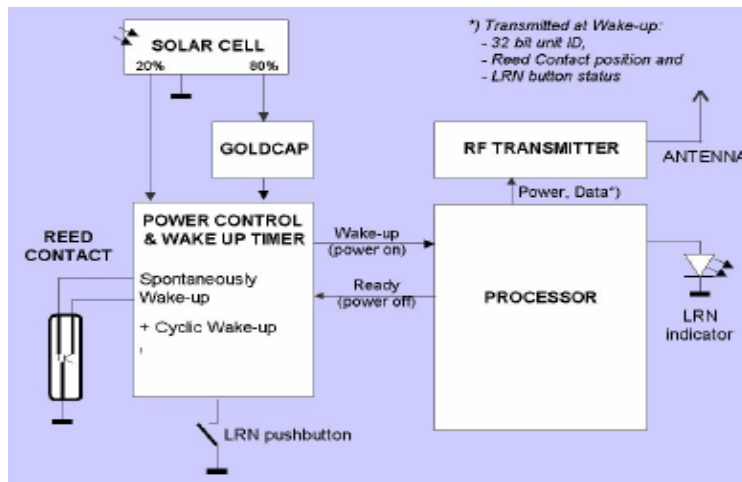


Fig. 18. Imagen interior del sistema transmisor STM 250.

Como sistema de alimentación tenemos una placa solar encargada de alimentar el sistema de radio. Esta placa es capaz de proveer los 10 mW máximos necesarios para la transmisión RF (su rango de alcance es de unos 300 m en campo abierto y unos 30 m en interior), y tiene un modo “sleep” de funcionamiento en caso de no estar utilizándose (unos 25 nA de consumo) [43]. La placa solar necesita una iluminación entre 200 y 100.000 lux. El tiempo de alimentación previo de la batería para llegar a alimentar el sistema durante 14 horas en total oscuridad es de aproximadamente 5 horas con 1000 lux, 13 horas con 400 lux. El máximo tiempo de operación del sistema en total oscuridad puede ser mayor a 6 días en condiciones óptimas de funcionamiento.

Este sistema se puede utilizar para detectar apertura o cierre de puertas y ventanas, pulsaciones intencionadas para parar o arrancar un proceso, timbre de llamada de una puerta a distancia, etc.



(a)



(b)

Fig.19. (a) Esquema del sistema STM 250; (b) Aspecto final.

**Sistema STM 110:** otro producto de la marca EnOcean es el transmisor STM 110. Es un detector multifuncional con un módulo de transmisión de señales para controlar, por ejemplo, la temperatura, la iluminación de una habitación, el estado de puertas y ventanas o supervisar la entrada de tensiones o corrientes. Tiene tres entradas

de conversión A/D, de 8 bits cada una y cuatro entradas digitales para recibir información de sensores externos.

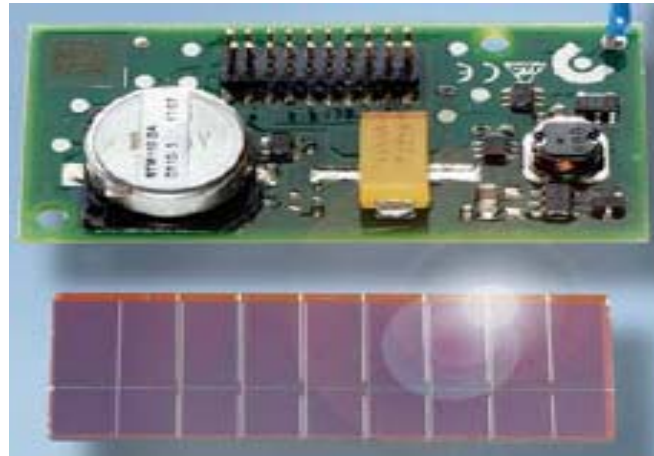


Fig. 20. Transmisor STM 110.

El sistema de alimentación es una placa solar muy pequeña y de gran rendimiento (también puede estar alimentado por una fuente externa de 3 a 4 V) junto a un chip de control. El tiempo para poner en marcha el sistema con la batería vacía es menor a 10 minutos con 400 lux de iluminación. El tiempo para cargar la batería vacía hasta un nivel de 14 horas de operación en total oscuridad es de 6 horas a 400 lux o 1,5 horas con 1000 lux [43].

El esquema del sistema completo aparece en la figura 21. A su lado se incluye un esquema de la salida de la célula solar. Para un mayor rendimiento, minimizando corrientes inversas que puedan estropear la célula, se debe conectar diodos Schottky del tipo BAS 125 en cada salida de la placa. Como se ve, el porcentaje más alto (70%) de superficie de la célula se utiliza para cargar la batería de reserva (Goldcap). El 30% restante alimenta la entrada principal para el suministro continuo de la electrónica, o bien mediante alimentación externa.

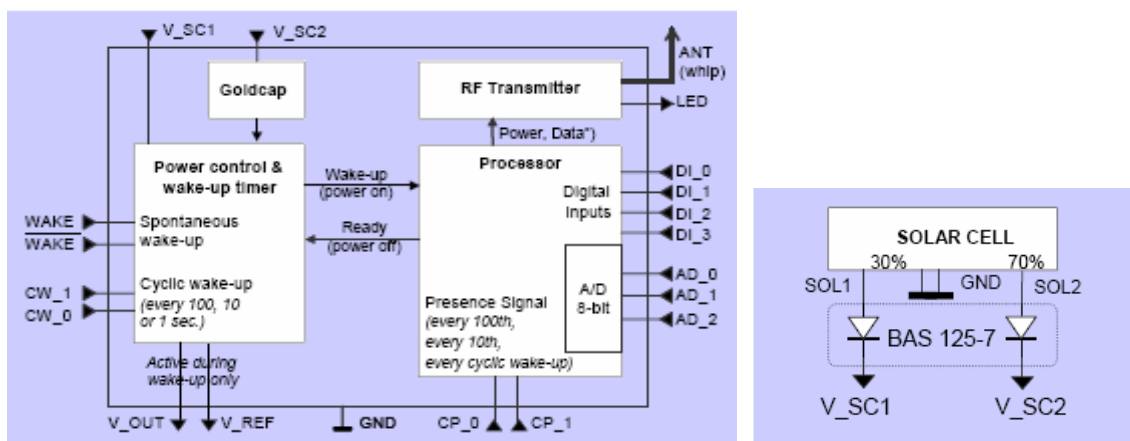


Fig. 21. Esquema del transmisor STM 100.

Como posible aplicación para este dispositivo se encuentra su uso en sistemas de fabricación automatizada dentro de una fábrica, interactuando con sensores y actuadores en la cadena de producción. En el exterior se puede utilizar para controlar parámetros en invernaderos y explotaciones agrarias. También para sistemas de seguridad.

**Redes de sensores wireless:** un nodo de una red de sensores consiste físicamente en un microprocesador, un dispositivo de almacenamiento de datos, sensores, convertidores AC-DC, un transmisor de radio, controladores y una fuente de energía [46]. Esta fuente puede ser el Sol u otras.



Fig. 22. Nodo de una red de sensores.

Estas redes se diseñan para realizar un conjunto de tareas de procesamiento de información, ya sea detección, rastreo, clasificación, etc. Permiten aplicaciones como el control del tráfico rodado, control de factores en sistemas de seguridad, aplicación en sensores de diagnóstico en fábricas y cadenas de producción, casas inteligentes, estudio del comportamiento de animales y plantas en su hábitat, aplicaciones médicas en el cuidado de las personas mayores, control de variación de parámetros en contenedores de aduanas, medida de factores en campos agrícolas, como la humedad, temperatura o radiación solar recibida, monitorización de maquinaria y detección de incendios en bosques entre otras muchas posibilidades.



Fig. 23. Sistema wireless utilizado en agricultura.

### **2.4.1.5 Conclusiones.**

Esta clase de microgeneradores obtienen una salida de corriente continua y una buena relación entre tensión y corriente. Por el contrario, dependen fuertemente de las condiciones de luz y del área de la célula, además de su bajo rendimiento ( $< 20\%$ ).

Las placas de silicio utilizadas para alimentar pequeños sistemas tienen una densidad de potencia entre decenas de  $\mu\text{W}$  y decenas de  $\text{mW}$  por  $\text{cm}^2$  aproximadamente para el exterior. En zonas interiores iluminadas suelen estar por debajo de las decenas de  $\mu\text{W}$  por  $\text{cm}^2$  [10].

Estos sistemas tienen grandes ventajas, como no tener partes móviles que se deban mover para generar, lo cual alarga la durabilidad del conjunto, así como reducir su tamaño. Se ha mencionado la gran reducción de energía en interiores, lo que limita su uso, en principio, a lugares al aire libre. Por tal motivo se ven limitadas sus aplicaciones en dispositivos portátiles, ya que se hace complicada la carga de aparatos mientras se llevan encima, básicamente por la variabilidad de las condiciones de exposición a la luz. Sin embargo algunos fabricantes abogan cada vez más por instalar directamente los módulos solares en el aparato propiamente dicho para que sirva de apoyo a la batería. En algunos casos se elimina la necesidad de recarga en red. Debido a la mejora en la eficiencia de los pequeños módulos, la existencia de teléfonos móviles solares y otros dispositivos similares es una realidad.

Como ya se mencionó anteriormente, un uso lógico es el de cargador de baterías durante el día para realizar un uso nocturno de la energía obtenida, como en el caso de los indicadores de posición en bicicletas, brazaletes, señales de obra, cargadores de pilas recargables para mandos a distancia, etc. Otro campo de expansión para los sistemas solares es el de la robótica, llegando a formar parte de sistemas de recarga auxiliar para redes de sensado y alimentación en robots lúdicos y de entretenimiento.

Hay que decir que las placas fotovoltaicas llevan siendo utilizadas para la autoalimentación de muchos sistemas de bajo consumo y de otro tipo desde hace décadas. A pesar de no estar pensados para elementos portátiles se ha conseguido transformarlas para su uso como cargadores, dentro de estuches o incluso en la ropa, ampliando así sus posibilidades. La rebaja paulatina del precio, la reducción del consumo de los chips electrónicos y la cada vez mayor eficiencia en la conversión de la luz en electricidad auguran un uso masivo de estos dispositivos en casi cualquier ámbito.



## **2.4.2 SISTEMAS TERMOELÉCTRICOS.**

### **2.4.2.1 Introducción. El efecto Seebeck.**

Cuando se someten los extremos de un conductor eléctrico a dos temperaturas diferentes, el extremo más caliente siempre tenderá a mantener el equilibrio en el material, transmitiendo por conducción parte de ese calor al extremo de menor temperatura. Este proceso de transmisión de calor tiende a mover portadores de carga eléctrica (electrones o huecos) en la misma dirección que éste, produciendo una diferencia de carga entre los extremos (figura 24(a)). Si cerramos el circuito obtendremos una corriente eléctrica. Ahora bien, si el material con que cerramos el circuito es igual al primero, al calentar un extremo los portadores de carga, cuyo número es igual por tratarse del mismo material, tenderán a ir en el mismo sentido (de la zona caliente a la fría) y no se obtendrá una corriente eléctrica (figura 24(b)). Por ello se utilizan dos conductores de diferente material para formar el circuito. Así se tendrán diferentes capacidades para mover los portadores de carga en respuesta al flujo térmico. El material con más capacidad para mover los portadores de carga es quien fijará la dirección de la corriente (figura 24(c)). La corriente generada es por tanto igual a la diferencia de capacidades para generar corriente en ambos materiales. Introduciendo un voltímetro seremos capaces de medir la diferencia de carga en ambos extremos una vez se aplique calor en uno de ellos (figura 24(d)). La tensión generada es función de dos factores: la diferencia de temperatura entre las dos uniones y la naturaleza de los materiales utilizados.

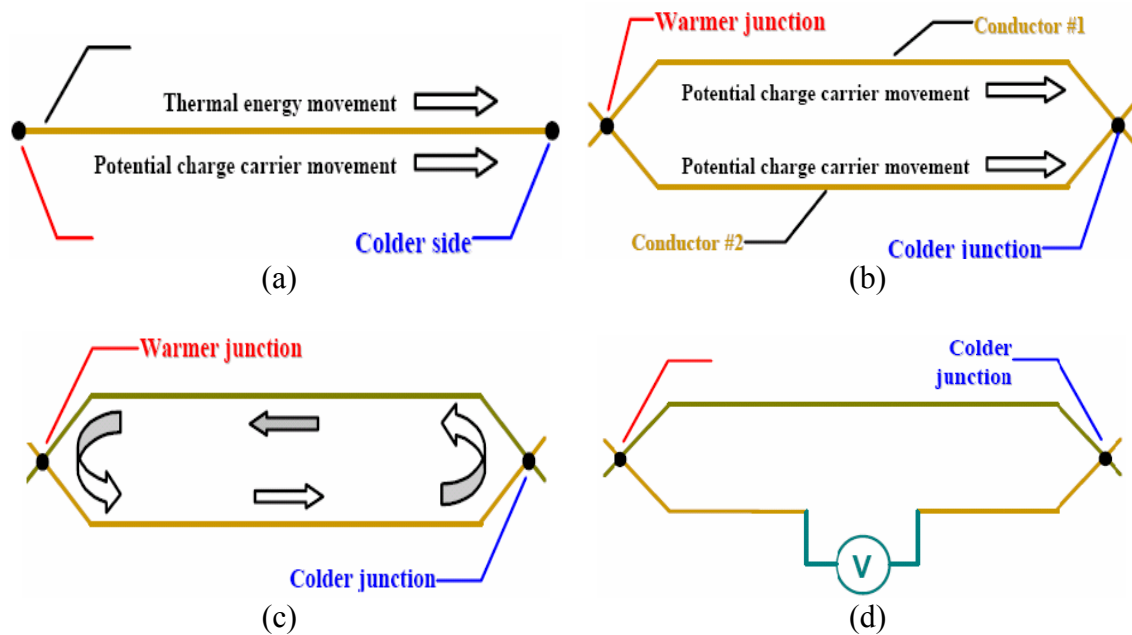


Fig. 24. Proceso de generación de energía mediante un termopar.

## Sistemas termoelectricos.

Este fenómeno fue observado por primera vez en 1821 por el físico alemán Thomas Seebeck, y se conoce como efecto Seebeck. Los ejemplos más conocidos de este fenómeno son las termouniones (tipo K por ejemplo). Estas termouniones no se fabricaron para generar energía, sino para medir temperatura (termopares).

El rendimiento de un sistema de este tipo depende en gran medida de varios factores que se relacionan de la siguiente manera:

$$Z = \alpha^2 \frac{\sigma}{\kappa} \quad (7)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente Seebeck,  $\sigma$  es la conductividad eléctrica y  $\kappa$  es la conductividad térmica [2]. Es necesaria una gran  $Z$  (figura de mérito) para obtenerse altas eficiencias y densidades de potencia, ya que da una idea de la sensibilidad del sistema.

### 2.4.2.2 Célula de calor: composición y funcionamiento.

La célula de calor es el componente principal de un módulo termoelectrico. Los dispositivos para generación de este tipo utilizan materiales semiconductores especiales, optimizados para el efecto Seebeck. En el circuito de la figura 25 se puede ver un circuito formado por un semiconductor de tipo N conectado a un voltímetro. Cuando el calor se mueve de la zona caliente a la fría, los portadores de carga (electrones de los materiales dopantes) se mueven con él. Si utilizamos un material tipo P, los portadores en este caso huecos libres introducidos por los elementos dopantes, siguen el camino del calor, por lo que los electrones circulan en sentido contrario.

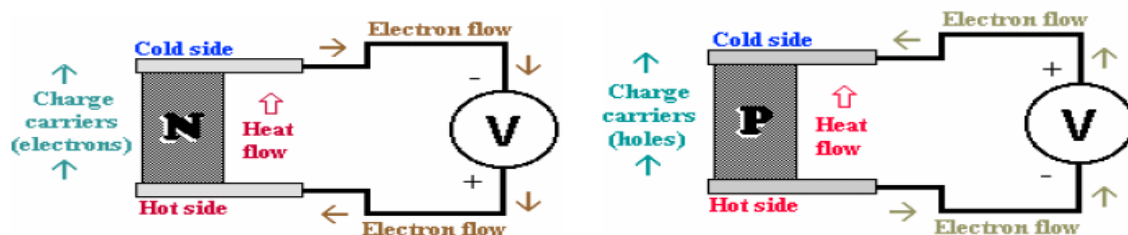


Fig. 25. Medida de tensión en una termounión con semiconductores N y P.

Visto que los electrones van en sentido contrario en materiales tipo N y P, es lógico pensar en la unión de ambos para formar un gran circuito cerrado formado por muchas células N-P eléctricamente en serie (térmicamente en paralelo). Al unir muchas células en serie se consigue una fuente de tensión cada vez mayor con el fin de obtener un nivel adecuado a la salida. Se calcula que la tensión generada por cada célula es, en algunos casos, de hasta 20 mV [2].



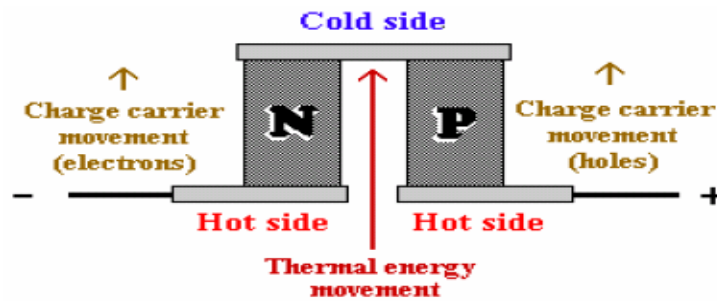


Fig. 26. Estructura de una célula de calor.

La disposición de los materiales semiconductores es vertical, lo cual tiene ventajas e inconvenientes. La principal ventaja es aprovechar mejor el calor que fluye de abajo a arriba, ya que con una fabricación en el mismo plano de la base se perdería. El principal inconveniente es la necesidad de una fabricación más compleja, descartando las técnicas tradicionales mediante máscaras. Actualmente se ha llegado a la conclusión de que para mejorar el nivel de salida se disponga de varios miles de estas células, donde la longitud del semiconductor sea muy pequeña para evitar pérdidas de rendimiento.

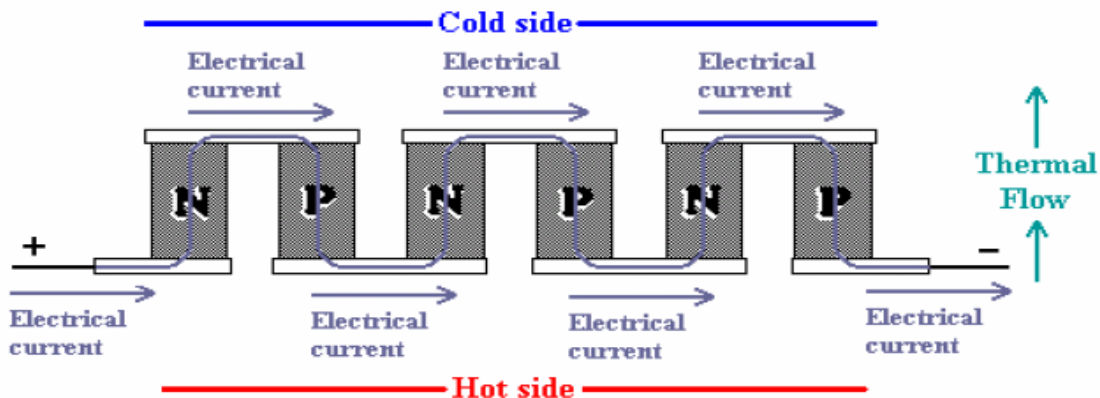


Fig. 27. Unión de células en serie.

Para conseguir mayores potencias se utilizan en algunos casos distintos niveles. Las placas multinivel nos permiten conseguir saltos térmicos importantes frente a la temperatura ambiente, pudiendo llegar incluso a diferencias de 130° C (Figura 28(a)). Las potencias a disipar a medida que aumentamos los gradientes térmicos son cada vez mayores. Debido a esto hemos de poder refrigerar puntualmente.

Las células convencionales están compuestas esencialmente por silicio y germanio, ya que mantienen un rendimiento suficiente para mayores diferencias de temperatura que otros materiales. Por otra parte, las placas de mayor rendimiento del mercado y por ello las más usadas en la industria son las de telururo de bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) y seleniuro de antimonio. Debido a la escasez de los elementos y a la baja producción de energía de las placas, el coste de éstas es aún elevado.

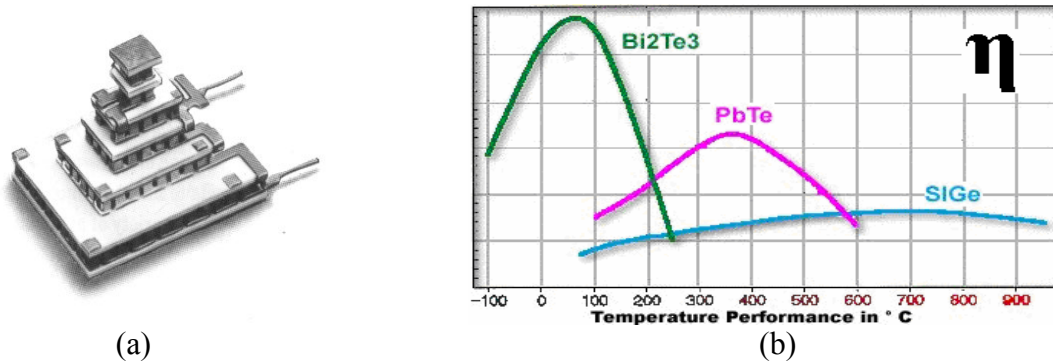


Fig. 28. (a) Placa multinivel; (b) Curvas de rendimiento de materiales termoelectricos.

La potencia máxima obtenida en un generador termoelectrico (8) es proporcional a  $A/l$ , siendo  $A$  la sección transversal de cada elemento de material semiconductor y  $l$  la longitud del mismo [3]. La fórmula para esta potencia es:

$$P = \frac{\alpha^2}{2\rho} \frac{NA\Delta T^2}{(l+n)(1+2rl_c/l)} \quad (8)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente Seebeck (derivada de la tensión respecto de la temperatura),  $\rho$  es la resistividad eléctrica de los materiales de la unión,  $N$  el número de termouniones en el módulo,  $A$  el área de sección lateral de las termouniones,  $l_c$  es el grosor de las capas del material cerámico aislante,  $n = \rho_c/\rho$  y  $r = \lambda/\lambda_c$ , donde  $\rho_c$  son la resistividad de contacto eléctrica y  $\lambda_c$  la conductividad térmica de contacto respectivamente.

La densidad de potencia es inversamente proporcional a la longitud debido a la mayor dispersión del calor, con lo que la potencia específica puede aumentarse reduciendo esta longitud y manteniendo el mismo diámetro. Así mismo depende de la tecnología de fabricación utilizada, donde cada fabricante obtiene distintos resultados, que sin embargo son de un orden de magnitud similar.

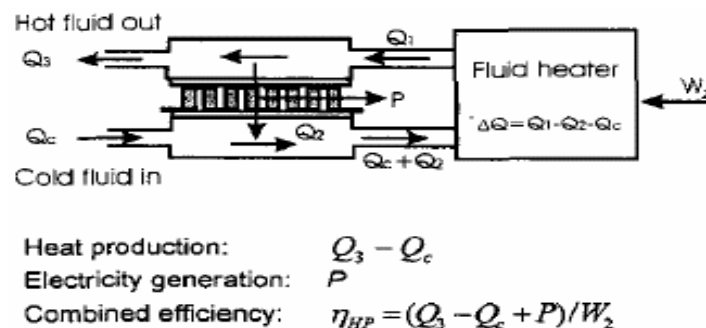


Fig. 29. Esquema de funcionamiento.

### 2.4.2.3 Fabricación.

Hay que decir que los métodos de fabricación varían sensiblemente en función de los materiales y las topologías utilizadas. En los casos más comunes se procede primeramente al crecimiento del sustrato de  $\text{SiO}_2$ , y se metaliza su superficie con cobre para conseguir la interconexión de las células. Para la difusión de la barrera de cobre se añade níquel. En el montaje de algunas células termoelectricas se aplica doble barrera de níquel con la finalidad de evitar un rápido deterioro en un constante cambio de tensiones. Entonces se procede a la deposición de las células o “piernas” de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  en unos agujeros previamente realizados con unos patrones muy pequeños. Es, por tanto, una combinación de electrodeposición del material semiconductor con técnicas de fotolitografía convencional adaptadas especialmente a patrones muy finos [4].

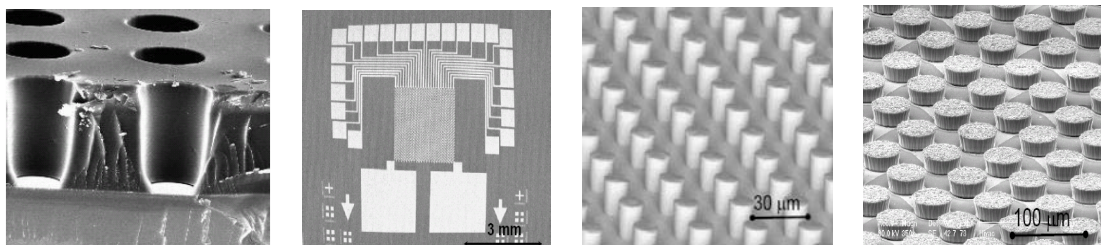


Fig. 30. Imágenes del proceso de fabricación.

### 2.4.2.4 Proyectos y ejemplos de aplicación práctica.

**Reloj de pulsera:** como ejemplo práctico de utilización de este tipo de sistemas se presenta el proyecto de Seiko Instruments, que consiste en un reloj de pulsera que aprovecha la diferencia de temperatura entre la muñeca del usuario y la atmósfera. Utiliza 10 módulos termoelectricos conectados en serie, capaces de generar a partir de un pequeño gradiente de temperatura los suficientes microvatios para mover el mecanismo mecánico del reloj. Se cuenta con un total de 104 células de efecto Seebeck, fabricadas con  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (las más eficientes para un rango de 0 a 100 °C) y encerradas entre dos sustratos de silicio de 2 mm x 2 mm. Con una diferencia media de 1 a 3°C entre la zona caliente y la fría, el sistema completo genera hasta 1,5  $\mu\text{W}$  [9].

Este reloj, a diferencia de otros, no utiliza un motor magnético, sino cuatro motores que funcionan a partir de las vibraciones ultrasónicas producidas por un elemento piezoeléctrico. En este caso, el piezoeléctrico va integrado en el oscilador. Este tipo de sistemas no se ven influenciados por campos magnéticos, además de ser muy pequeños y tener gran par de giro. El mayor inconveniente es la necesidad de un circuito elevador de tensión para hacer oscilar el piezoeléctrico.

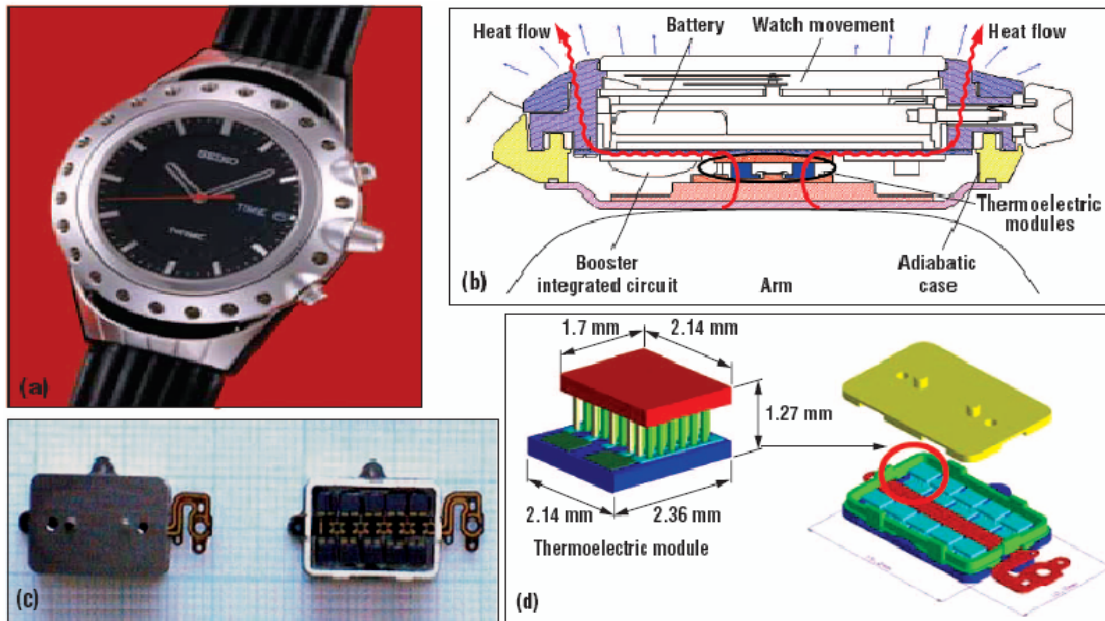


Fig. 31. Reloj de pulsera Seiko Thermic: (a) el producto; (b) sección trasversal; (c) módulos termoelectricos; (d) módulo termoelectrico.

En la figura 31(b) observamos la sección trasversal del reloj térmico. La base del reloj, en contacto con la muñeca transmite por conducción el calor a los módulos, que generan pequeñas diferencias de potencial. La tensión total obtenida se aumenta de nivel en un conversor continua- continua de topología elevadora hasta el nivel adecuado para mover el sistema mecánico. Dicho conversor está integrado en un chip, situado a la izquierda de los módulos según la figura 31(b). Encima del conversor se encuentra la pila de litio recargable, que almacenará la energía extra cuando la diferencia de temperatura sea grande. El calor residual de los módulos sale al exterior mediante una zona hueca, situada entre el sistema mecánico y el de alimentación. Esta zona se comunica con el exterior mediante los agujeros de la esfera (figura 31(a)). La zona de amarillo (figura 31(b)) es la caja del reloj y es de material adiabático para evitar la pérdida de calor en el interior.

Además del proyecto de Seiko hay otros tantos cuyo principal interés es la investigación y mejora de las capacidades de estos microgeneradores. Algunos de estos sistemas desarrollados actualmente son:

**Microgenerador de la Universidad de California:** en este caso se utiliza una película fina con forma de enrejado, formada por 400 termouniones n y p usando elementos como el indio, el galio, aluminio y arsénico. Además, los elementos termoelectricos incorporan nanopartículas metálicas de arseniuro de erbio para proporcionar portadores de carga. Se midió una salida de 4,7 mW en una resistencia externa de 150  $\Omega$  cuando la temperatura en toda la superficie era de 80 °C. Cada elemento tenía 10  $\mu\text{m}$  de grosor y 200 x 200  $\mu\text{m}$  de área [5].

**Segundo sistema:** un proyecto conjunto entre la Universidad de California, el MIT, el Instituto de Tecnología de California y el Laboratorio de Propulsión a Chorro ha permitido desarrollar un pequeño generador térmico cuyos elementos termoelectricos están en el mismo plano de la base, en vez de quedar verticalmente. En este caso la longitud de los termoelementos es de  $266\text{ }\mu\text{m}$ , con dimensiones de la placa de  $1,6 \times 1,6\text{ mm}$ . Se obtuvo una potencia máxima de  $60\text{ }\mu\text{W}$  a  $1,5\text{ V}$  [1]. Según el equipo se puede producir hasta  $1\text{ mW}$  de energía eléctrica a partir de  $100\text{ mW}$  de energía calorífica con tecnología de película fina. En el futuro se trata de reducir la resistencia de los contactos eléctricos, buscar mejores materiales y desarrollar las propiedades termoelectricas de las películas con un coste económico aceptable.

**Tercer sistema:** un generador de baja potencia llamado LPTG ha sido fabricado en Alemania por D.T.S. Thin Film Thermoelectric Generator Systems GmbH. El dispositivo mide  $9\text{ mm} \times 7,5\text{ mm} \times 2,8\text{ mm}$  y pesa  $390\text{ mg}$ . La salida nominal es de  $20\text{ }\mu\text{W}$  y  $4\text{ V}$  con  $\Delta T = 20\text{ K}$ . Una mejora posterior asegura una densidad de  $15\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$  para un gradiente de  $10\text{ K}$  [7] [8]. El fabricante propone en su página web: <http://www.dts-generator.com/main-e.htm> como posibles aplicaciones a su producto la alimentación de relojes de pulsera, transpondedores activos, displays de temperatura o recarga de sistemas electrónicos entre otras.

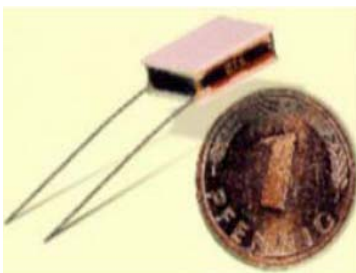


Fig. 32. Imagen del generador termoelectrico LPTG de la empresa D.T.S.

**Cuarto sistema:** la empresa Applied Digital Solutions anunció en octubre de 2001 el desarrollo de un generador termoelectrico en miniatura con una salida de  $1,5\text{ V}$  para alimentar relojes de pulsera, dispositivos médicos embebidos, electrónica portátil, etc. En 2002 lo comercializó con el nombre Thermo Life, asegurando con una superficie de  $0,5\text{ cm}^2$  una potencia de salida de  $30\text{ }\mu\text{W}$  ( $3\text{ V}$  y  $10\text{ }\mu\text{A}$ , con  $6\text{ V}$  a circuito abierto) para una  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$  [7]. Con una  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  se es capaz de generar hasta  $135\text{ }\mu\text{W}$  ( $5,5\text{ V}$  y  $25\text{ }\mu\text{A}$ , con  $11\text{ V}$  a circuito abierto).

**Quinto sistema:** otra empresa, en este caso Biophan Technologies, ha desarrollado generadores termoelectricos para su implantación en el cuerpo humano, con el fin de asegurar durante años la alimentación ininterrumpida de chips médicos y otros dispositivos. Aseguran que es capaz de generar  $100\text{ }\mu\text{W}$  con solo una  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  y  $10\text{ cm}^2$  [54].

Algunas ideas para este tipo de sistemas pueden ser:

**Aplicación en un motor:** todas las placas anteriores se pueden utilizar en aplicaciones donde se tengan fuentes de calor, como es el caso de lámparas, flexos,



## Sistemas termoelectricos.

proyector, motores, etc. En un motor de cualquier tipo se puede medir su temperatura y tiempo de funcionamiento con el fin de enviar señales de radio y actuar sobre un sistema de refrigeración. El encendido y control de velocidad de la bomba se consigue en función de los códigos enviados por el sistema de control, alimentado éste por placas Seebeck.

En el caso de un proyector, se puede sustentar el mecanismo de control que regula la velocidad de un ventilador, dedicado a expulsar el aire caliente de las aletas del disipador.

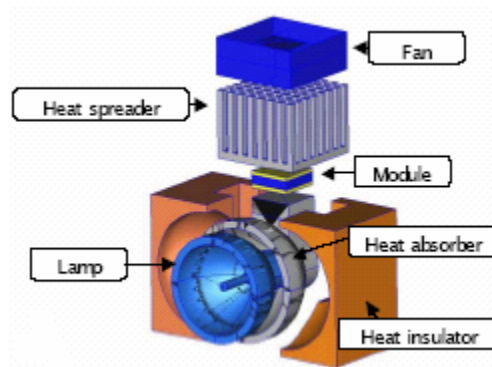


Fig. 33. Módulo termoelectrico en un proyector.

**Contador de tiempo:** en el caso de lámparas y flexos, los cuales disipan gran cantidad de calor, se podría sustentar un contador del tiempo de encendido y disponer su apagado una vez transcurrido el período programado, caso de las luces en los portales, aseos públicos, bibliotecas, etc. También podríamos apagarlo nosotros mismos.

El sistema funcionaría mediante un emisor colocado en un pulsador en la pared, el cual puede ser autoalimentado a través del esfuerzo mecánico de pulsar el botón. Al hacer esto se envía un código al receptor del techo, el cual se sustenta con un microgenerador térmico. Éste se encarga de recavar energía y almacenarla en una batería cuando la lámpara esta encendida. Al recibirse el código de encendido se permite el paso de corriente a las bombillas. Esto asegura la reducción del cableado, necesitándose una única unión de las lámparas de toda una casa con la red.

**Medición de temperatura:** uno de los usos más claros es como termómetro para medir temperatura en diferentes lugares (recintos cerrados, el cuerpo humano, etc). Los termómetros actuales son cada vez más sencillos y de menor consumo, ya que trabajan tomando muestras cada cierto tiempo. En el caso de tomar una medida de temperatura en el cuerpo humano, únicamente necesitamos mantener el dispositivo con la placa Seebeck en contacto con la piel durante un período de tiempo suficiente para cargar su batería y activar el dispositivo que toma la muestra.

**Usos en medicina:** quizá con el tiempo sea posible el uso generalizado de placas Seebeck en aplicaciones médicas, como audífonos o marcapasos. En el caso de audífonos se podrían sustituir en un futuro las pequeñas pilas de botón, de distintos tamaños según el tipo y las funciones del aparato, por placas térmicas de tecnología fina, evitándose así tener que llevar el audífono al especialista para cambiar la pila. Esto es imposible

actualmente debido a baja energía recavada y el tamaño de las placas, aunque existe la posibilidad de una utilización conjunta para incrementar la durabilidad de las pilas. La fuente de calor serían, además del cuerpo, todos aquellos aparatos que tenemos en casa (flexos, ordenadores, placas de inducción, etc), los cuales disipan gran cantidad de energía en forma de calor, en algunos casos del orden de centenas de vatios. Pensando en un cargador de baterías para el audífono, se podría cargar su batería cuando no se haga uso de él, preferiblemente por la noche mientras se duerme a través de la calefacción.

### **2.4.2.5 Conclusiones.**

Las placas Seebeck aprovechan la diferencia de temperatura entre sus placas, recavando con ello carga eléctrica. Esto exige la ubicación de la placa cerca de una fuente de calor suficiente para la aplicación deseada. Por tal motivo son altamente interesantes para funcionar conjuntamente con células de combustible, dado el calor generado por éstas al funcionar. En usos de muy bajo consumo, estos sistemas pueden llegar incluso a sustituir a las células de combustible para un número suficiente de elementos semiconductores en la placa. Su eficiencia en la conversión, tomada como tal la energía eléctrica producida a partir de la energía calorífica total aplicada, depende en gran medida de la tecnología utilizada, siendo por lo general muy baja (por debajo del 5 %). La densidad de potencia media puede considerarse de hasta decenas de  $\mu\text{W}$  para un gradiente de aproximadamente  $10^\circ\text{C}$ , aunque en algunos casos esta muy por debajo.

El objetivo de varias investigaciones es aumentar la densidad de potencia para el menor gradiente de temperaturas posible, consiguiéndose placas más pequeñas, eficientes y baratas, ya que actualmente son caras y los fabricantes muy escasos, con lo que suele ser la investigación su campo de aplicación más común. Para ello es necesario el uso de materiales optimizados para microgeneración, con resistividades eléctricas menores para mejorar la conductividad, reducción y optimización geométrica del área de contacto entre células para aumentar la cantidad de termouniones, estudio de la relación entre el área de sección transversal y la longitud de las uniones N y P para aumentar la energía en cada unión, etc.

Por su parte son sistemas fiables y de alta durabilidad, obteniendo además una salida en continua. Ha quedado demostrada su capacidad de alimentación de aparatos de consumo extremadamente bajo con reducidas diferencias de calor entre sus superficies. Si el tamaño de la placa no es importante porque se utilice de forma estanca en conjuntos grandes, la energía total obtenida puede ser incluso de varios vatios, suficiente para cualquier circuito de control. Esta forma de uso es normal en motores, calderas de calefacción, disipadores de calor, resistencias eléctricas, automóviles, etc.

## **2.4.3 SISTEMAS QUÍMICOS.**

### **2.4.3.1 Microgeneradores químicos. Introducción.**

Los microgeneradores químicos generan energía eléctrica a partir de reacciones entre un combustible y un oxidante sin ningún proceso de combustión, obteniéndose un mayor rendimiento. No hay que confundirlos con las baterías, cuya función es almacenar energía eléctrica para utilizarla en determinados momentos.

En la actualidad, los sistemas que forman principalmente este grupo son las conocidas como fuel cell o células de combustible. Su desarrollo ha permitido la alimentación desde pequeños sistemas electrónicos hasta automóviles o autobuses. Existen diferentes tipos en función de la tecnología utilizada:

- Carbonato fundido (MCFCs): su electrolito es la sal carbonatada, funcionando a una temperatura de operación entre 600 y 1000 °C, lo que aumenta la corrosión y facilita la ruptura de los componentes. Por contra obtiene altas eficiencias del combustible con base de carbón, siendo su principal aplicación la generación eléctrica.

- Óxido sólido (SOFCs): estos sistemas utilizan generalmente como electrolito un material cerámico duro en vez de un líquido (generalmente óxidos de itrio o zirconio), con lo que se consiguen temperaturas de operación entre 800 y 1000°C. Los rendimientos en la generación pueden llegar al 60%, con aplicaciones de alta potencia en centrales de generación.

- Ácido fosfórico (PAFCs): utilizan ácido fosfórico como electrolito ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), con rendimientos de más de 40%, y hasta el 85% si se aprovecha en cogeneración el vapor que se genera. La temperatura de operación ronda los 400 F (204°C). Son las más desarrolladas en el campo comercial y se utilizan en el ámbito de generación de energía eléctrica para hoteles y demás negocios, así como en vehículos grandes.

- Alcalinas: tienen un electrolito líquido alcalino, generalmente hidróxido de potasio (KOH), con rendimientos cercanos al 70%, funcionando a temperaturas entre 90 y 100°C. Son utilizadas en aplicaciones militares y espaciales por sus prestaciones de corriente, debido esto a su rápida reacción catódica. Se requiere eliminar el  $\text{CO}_2$  producido en la reacción para no perder rendimiento rápidamente.

- Polímero sólido o Membrana de Intercambio de protones (PEM): tienen un polímero sólido como electrolito, lo que reduce la corrosión y las fugas. Operan a relativa baja temperatura (entre 60 y 100°C) lo que impone la utilización de un catalizador caro como el platino e hidrógeno de gran pureza. Tienen una densidad de potencia alta, con capacidad de cambios rápidos en su salida, con lo que se usan en sistemas que necesitan una demanda rápida, tales como sistemas de generación eléctrica estacionarios y automóviles. Como todas las células anteriores, suele utilizar hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) como combustible, exceptuando las que utilizan metanol.

En el caso de microgeneración nos interesa este último tipo (PEM) por sus buenas características para su uso en dispositivos portátiles, densidad de potencia y seguridad en situaciones extremas (baja temperatura de funcionamiento). Dentro de las PEM, las más desarrolladas son las de conversión directa de metanol (DMFC) y las que usan como



## Sistemas químicos: células de metanol e hidrógeno.

combustible hidrógeno. En apartados diferentes se estudian a modo de curiosidad otros tipos de células, como son las que funcionan con agua, glucosa y orina.

### 2.4.3.2 Célula de metanol.

#### 2.4.3.2.1 Composición y funcionamiento.

Este tipo de célula está compuesta básicamente de dos electrodos: ánodo para la entrada del combustible y cátodo para la entrada de aire, y un electrolito, fabricado generalmente a base de polímeros. Para acelerar la reacción se suele usar platino como catalizador, lo que aumenta el coste de producción de estos sistemas.

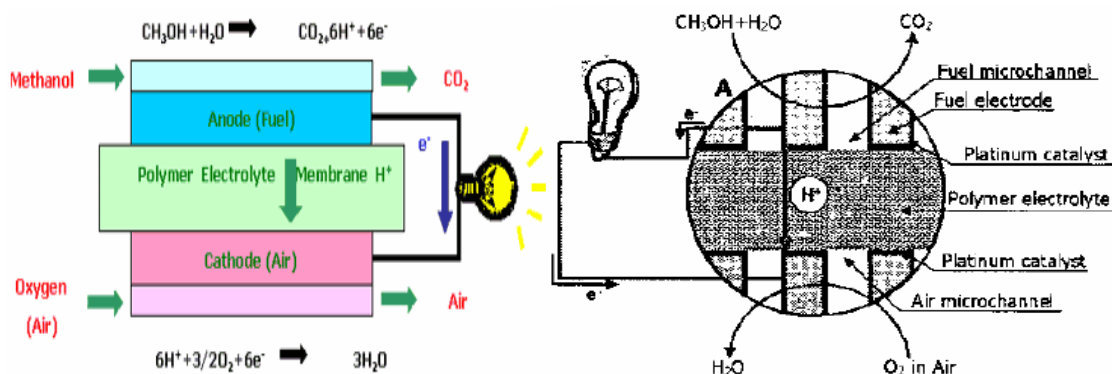
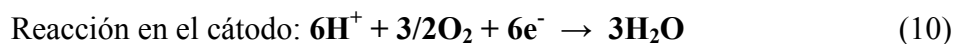


Fig. 34. Principio de funcionamiento de la célula de metanol.

En este proyecto se ha desarrollado un electrodo con forma hexagonal y rugosa con el propósito de comparar los resultados con los electrodos de estructura planar.

En las células antiguas, la reacción del metanol se realizaba en tres etapas, liberándose dos electrones en cada una de ellas. En las células actuales o DMFC (Direct Metanol Fuel Cell), la reacción se realiza en una sola fase:



El mayor problema del metanol es cuando se usa con un electrolito líquido alcalino como el hidróxido potásico, ya que el dióxido de carbono producido en la reacción anterior reacciona a su vez con el electrolito produciendo carbonato potásico. Esta reacción reduce paulatinamente la concentración de electrolito, perdiéndose así rendimiento:



## Sistemas químicos: células de metanol e hidrógeno.

Para evitar el efecto anterior se utiliza un electrolito sólido de polímero, generalmente Nafion. Este compuesto, fabricado por Dupont a base de copolímero de PTFE/ ácido perfluorosulfónico, permite absorber agua y de esta manera se convierte en un magnífico conductor de iones positivos por su estructura, bloqueando los negativos (en el caso del hidróxido de potasio bloquea los grupos  $\text{OH}^-$ ). Este hecho se asocia con la buena inercia química, resistencia mecánica y estabilidad de las resinas Teflón, con lo que se consigue un buen separador sólido entre los electrodos. Por el contrario trabaja mal a altas temperaturas y es caro.

### 2.4.3.2.2 Resultados experimentales.

En un proyecto conjunto del Centro de Nanolocomoción Digital y del Instituto de Ciencia y Tecnología Avanzada de Corea se han desarrollado dos tipos de células de metanol, cuya única diferencia radica en la forma de los microcanales del ánodo y el cátodo (hexagonales y cuadrados). Estos pequeños huecos ponen en contacto el combustible y el aire con el electrolito. Según el equipo responsable, la célula con microcanales hexagonales consiguió una densidad de corriente 1,73 veces mayor que la célula con microcanales cuadrados.

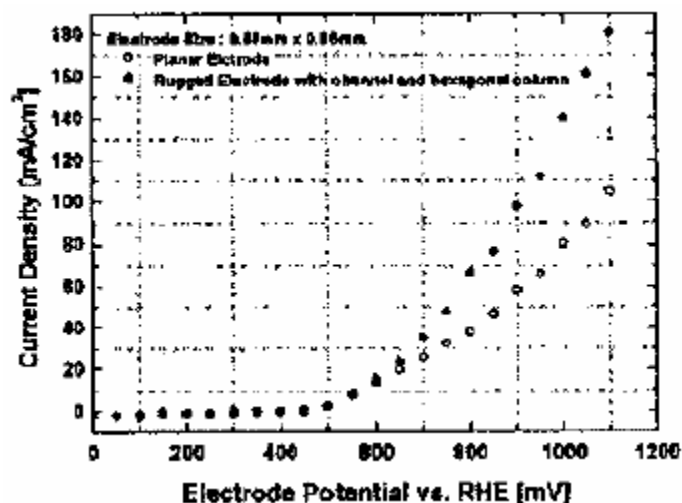


Fig. 35. Gráfico de densidad de corriente para una variación del potencial con microcanales hexagonales y cuadrados.

Las tensiones en circuito abierto para microcanales hexagonales y cuadrados son 870 mV y 330 mV respectivamente, como puede verse en la figura 36.

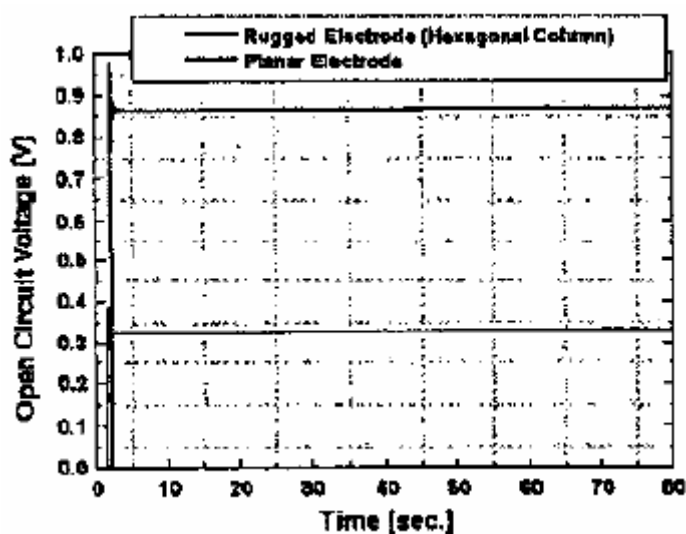


Fig. 36. Gráfico tensión en circuito abierto a lo largo del tiempo para ambos tipos de microcanales.

La célula con microcanales hexagonales entrega una potencia máxima de 24,8  $\mu\text{W}$  ( $122,4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) a una tensión de 0,65 V y un área de electrodo de 5 mm x 5 mm, mientras que la de microcanales cuadrados entrega 1,13  $\mu\text{W}$  ( $5,6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ), con una tensión de 0,08 V para el mismo área (22 veces mayor) [30].

#### **2.4.3.2.3 Fabricación.**

La célula DMFC esta elaborada usando un proceso de microfabricación con 3 máscaras. Primeramente se utilizan galletas de silicio tipo p como electrodo ( $525 \pm 25 \mu\text{m}$  de espesor). En el mismo lado de la galleta se empiezan a fabricar microcolumnas hexagonales (en este caso) con una altura de  $52 \pm 0,5 \mu\text{m}$  y una longitud del hexágono de  $22 \pm 0,5 \mu\text{m}$ . También se fabrican los microcanales con una profundidad de  $50 \pm 0,5 \mu\text{m}$  (etapa C de la figura 40). Para unir los microcanales y la cámara de fuel se utiliza un proceso de grabado utilizando hidróxido de potasio (KOH) y una máscara de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) de  $1,5 \mu\text{m}$  de espesor (etapa D). Después se deposita la capa del catalizador (de 200 a  $2000 \text{Å}$  de espesor de Cr/Pt). Posteriormente se coloca el electrolito de Nafión entre los dos electrodos y se comprime el conjunto a  $150^\circ\text{C}$  y 7 bares de presión durante 10 minutos (etapa F).

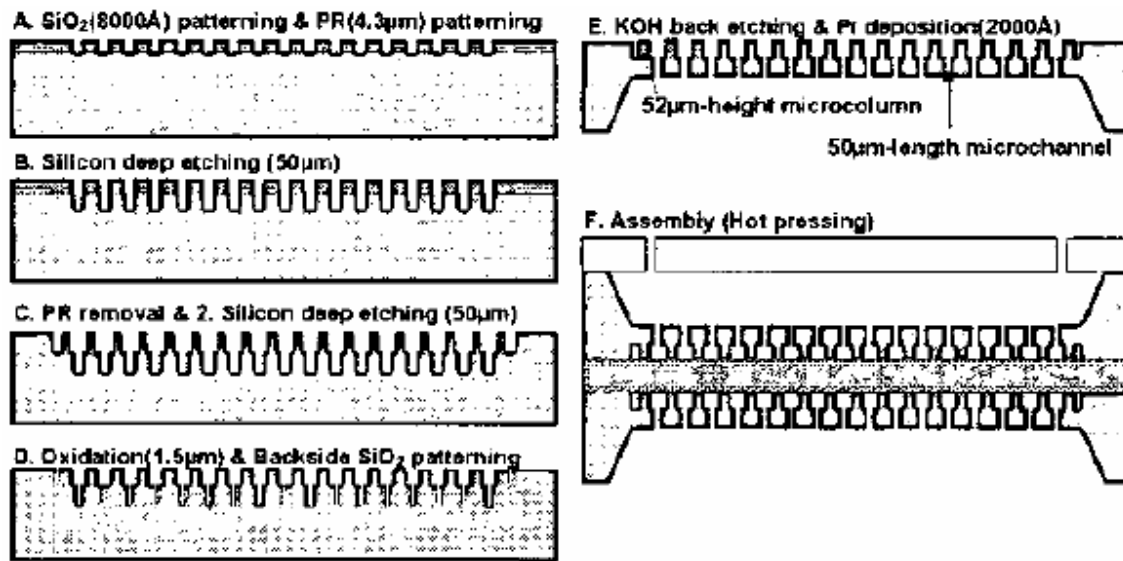


Fig. 37. Proceso de fabricación de la célula.

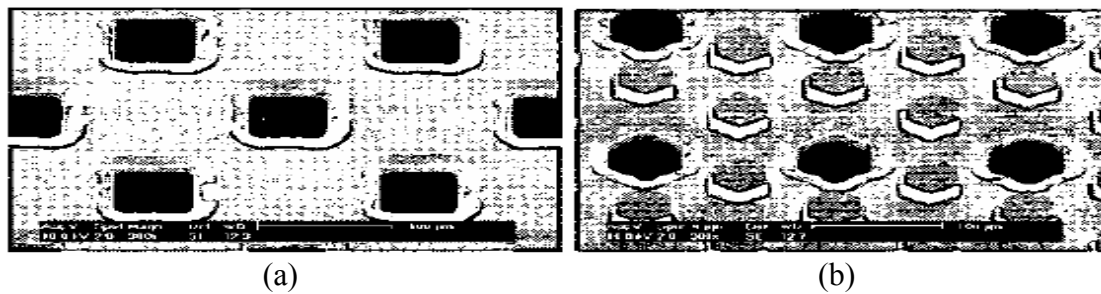


Fig. 38. Vista ampliada de los electrodos: (a) cuadrados y (b) hexagonales.

Tamaño total	6mmx6mmx1,2mm
Tamaño del electrodo	5mmx5mm
Cámara de fuel	5mmx5mmx0,42mm (10,5µl)
Altura de la microcolumna	52±0,5 µm
Profundidad del microcanal	50±0,5 µm
Espesor del electrolito (Nafión)	0,007 pulgadas (178 µm)

Tabla 5. Dimensiones de la célula.

### **Sistemas químicos: células de metanol e hidrógeno.**

Electrolito	0,5M $\text{H}_2\text{SO}_4$ + 3M $\text{CH}_3\text{OH}$
Electrodo de referencia	Ag/AgCl con KCl saturado
Electrodo de cómputo	Pt
Tensión de barrido	50 mV/segundo

Tabla 6. Condiciones experimentales.

Valor teórico	$\text{Ir}/\text{Ip} = 2,21$
Valor experimental	$\text{Ir}/\text{Ip} = 1,73$

Tabla 7. Valores estimados y experimentales del aumento en el ratio de densidad de corriente entre microcanales hexagonales y cuadrados.

Actualmente se están desarrollando células LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic Technology). Consisten básicamente en dos multicapas cerámicas, con microcanales embebidos para el combustible y un cátodo con entrada de aire. La misma célula lleva ya incorporada la electrónica de control y un sistema de almacenamiento [52].

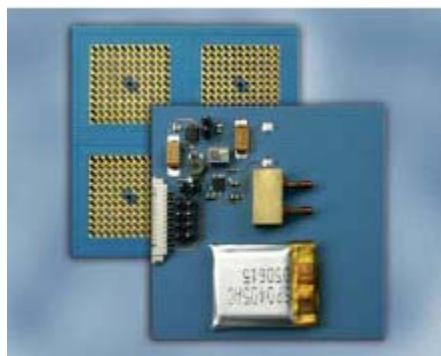


Fig. 39. Célula LTCC de metanol.

#### **2.4.3.3 Célula de hidrógeno: composición, funcionamiento y resultados.**

La composición de una célula de hidrógeno es muy parecida a la de metanol. En el ánodo se asiste a la oxidación del hidrógeno diatómico, rompiendo la molécula en dos iones positivos más los dos electrones libres, uno por cada átomo:

## Sistemas químicos: células de metanol e hidrógeno.

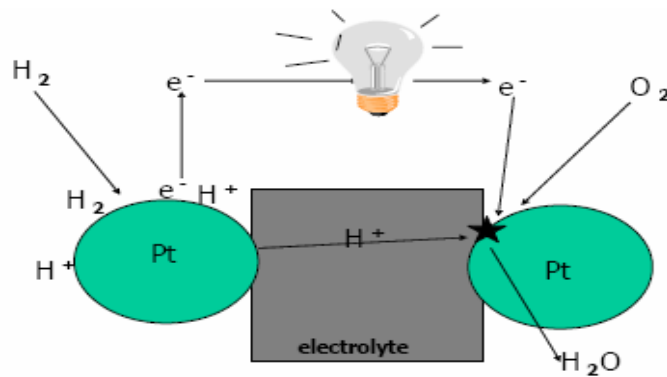
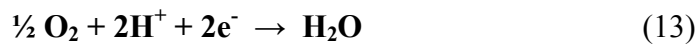


Fig. 40. Funcionamiento de una célula de hidrógeno.



Estos dos electrones circulan por el circuito externo hasta el cátodo, donde se produce agua a partir de estos iones positivos, que circulan por el electrolito, y oxígeno ambiental:



La reacción global es:

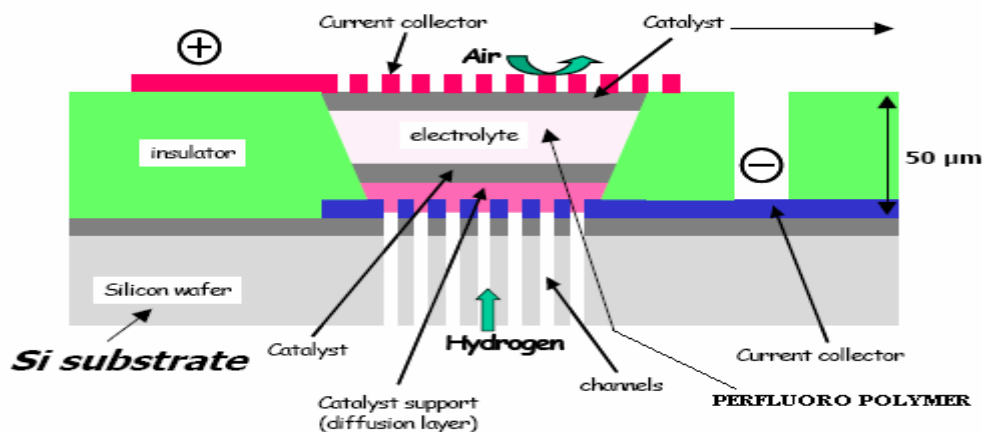


Fig. 41. Composición de una célula de hidrógeno.

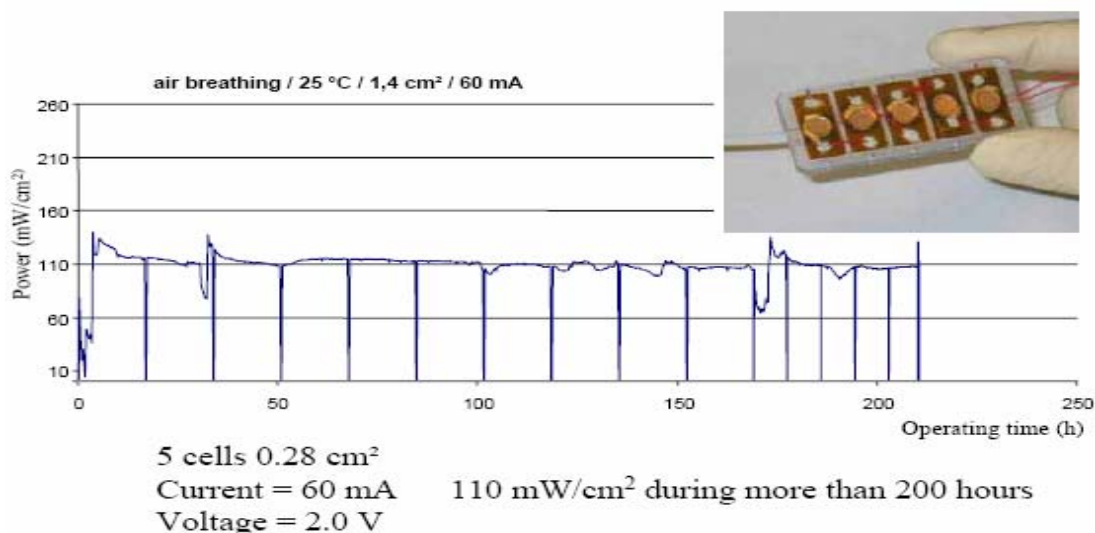


Fig. 42. Gráfico de densidad de potencia durante más de 200 horas de operación.

En la figura 42 puede verse la célula de hidrógeno fabricada por la Case Western Reserve University, compuesta por 5 pequeñas células de 0,28 cm<sup>2</sup> cada una (1,4 cm<sup>2</sup> de área total). Genera una media de 110 mW/cm<sup>2</sup> durante más de 200 horas seguidas [47], con lo que se puede alimentar aparatos portátiles de bajo consumo durante este tiempo.

En la primera generación de células de hidrógeno se esperaba un tope de 350 mW/cm<sup>2</sup>. A finales del 2006 se esperaba alcanzar con la segunda generación hasta 450 mW/cm<sup>2</sup>. Las previsiones estiman que a finales del 2010 se consiga una densidad alrededor de 1 W/cm<sup>2</sup>.

En el gráfico 43 se puede ver la comparación de resultados de potencia obtenidos para los casos de tener el hidrógeno en un tanque o de obtenerlo mediante la reacción de tetrahidrobórato de sodio (NaBH<sub>4</sub>). Como puede observarse, los resultados son muy parejos sin apenas diferencia [48].

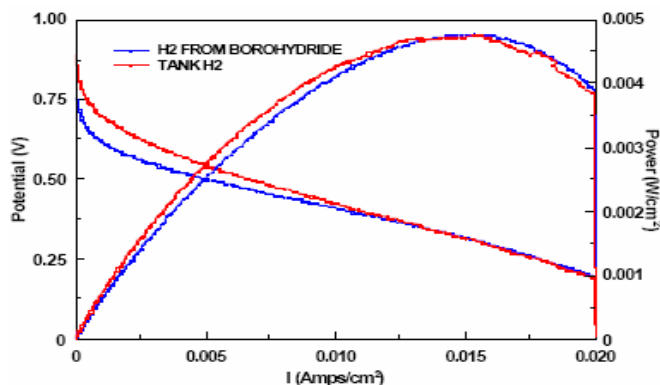


Fig. 43. Gráfico tensión-corriente-potencia para el hidrógeno de dos fuentes diferentes.

La posibilidad de obtener hidrógeno a partir de soluciones acuosas de  $\text{NaBH}_4$  hace que podamos tener otra fuente para una mayor autonomía.

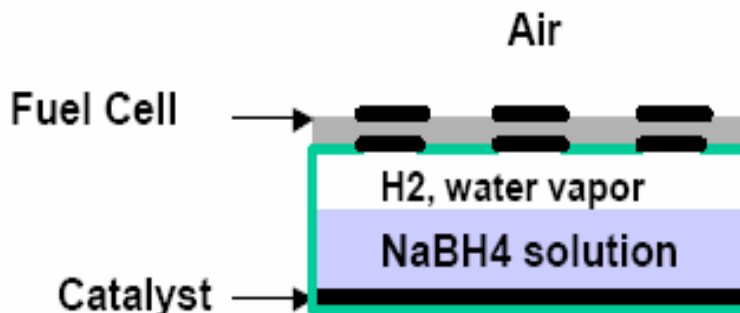
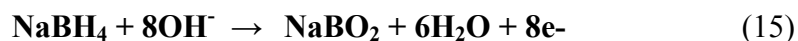
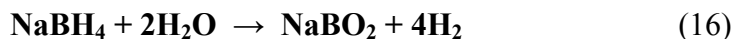


Fig. 44. Célula con generación de hidrógeno a partir de  $\text{NaBH}_4$ .

Este compuesto se oxida directamente conforme a la ecuación:



Esta reacción anterior es acelerada por el catalizador, pero éste también promueve otra reacción que produce hidrógeno. Son estas cuatro moléculas de hidrógeno obtenido las que reaccionan con el oxígeno ambiental para dar ocho grupos hidróxido.



También se puede utilizar este compuesto directamente para producir electricidad sin necesidad de generar hidrógeno. Se necesitaría mayor cantidad de compuesto, y ya no se hablaría de célula PEM, sino de una célula alcalina (SAFC). Estas células están en un rango de generación entre 10 y 20 W, más propias para otras aplicaciones. La reacción global es:

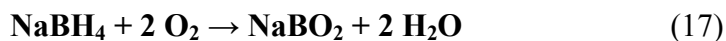






Fig. 45. Células de hidrógeno de distintos tamaños.

**NOTA:** Se han dejado fuera de estudio los llamados micromotores de combustión. Estas máquinas, desarrolladas principalmente a mediados de los 90 por el MIT, son de difícil integración en pequeños sistemas y presentan problemas, como producir una combustión en un lugar muy pequeño con muy escasa transferencia con el ambiente, lo que produce a su vez mucho calor a desalojar. Como es bien sabido, el calor y los componentes basados en el silicio no son buenos compañeros. Recientemente un proyecto conjunto de la Universidad de Cambridge y la de Birmingham estudia la realización de micromotores de combustión basados en materiales cerámicos con la intención de lograr motores en una plataforma de 5 x 15 x 3 mm, trabajando a un régimen de 50.000 r.p.m para conseguir unos 11 W de potencia [62].

#### **2.4.3.4 Aplicaciones y proyectos.**

**Reproductor de música:** la empresa japonesa Toshiba ha fabricado lectores Mp3 que albergan pequeñas células cuyo combustible es precisamente alcohol metílico o metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Estas microbaterías pueden mantener el dispositivo funcionando durante horas con apenas unos pocos mililitros de este compuesto.

Los dos prototipos DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) desarrollados tienen unos pocos milímetros de longitud y producen 100 y 300 mW respectivamente. En el primer caso se tiene una célula generadora con unas medidas de 76 x 23 x 10 mm, una capacidad de 2 cm<sup>3</sup> y un peso de 8,5 gramos con el tanque lleno, capaz de alimentar un reproductor Mp3 construido sobre memoria Flash durante más de 35 horas continuadas con apenas 3,5 ml de alcohol metílico concentrado. En el segundo caso se tiene una célula con unas medidas de 76 x 69 x 10 mm, capaz de alimentar un reproductor Mp3 de disco duro durante más de 60 horas con 10 ml, siendo su precio una fracción del de las baterías convencionales [53].

A pesar de ser el metanol un compuesto altamente inflamable, Toshiba espera desarrollar contenedores a prueba de fugas para transportar pequeñas cantidades del combustible con total seguridad.

## Sistemas químicos: células de metanol e hidrógeno.

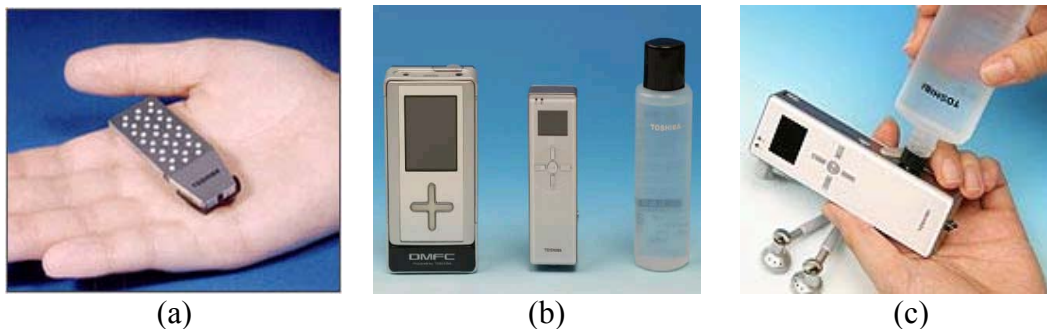


Fig. 46. Sistemas de la empresa Toshiba: (a) batería de metanol; (b) reproductores Mp3 de Toshiba; (c) recarga del reproductor.

**Ordenador portátil:** la empresa Fujitsu también ha desarrollado células de metanol, en este caso para ordenadores portátiles.



Fig. 47. Ordenador portátil de Fujitsu, unido a su batería y depósito de metanol recargable.

Esta batería de metanol tiene una potencia media de salida de 13 W, con un máximo de 20W al combinarla con baterías de ión-litio. La batería completa pesa 450g (sin fuel) y tiene una autonomía aproximada de 20 horas con 200 cm<sup>3</sup> de metanol [53].

**Teléfono móvil:** en la figura 48 puede observarse una célula de metanol alimentando un teléfono móvil, el cual no dispone de su batería convencional.

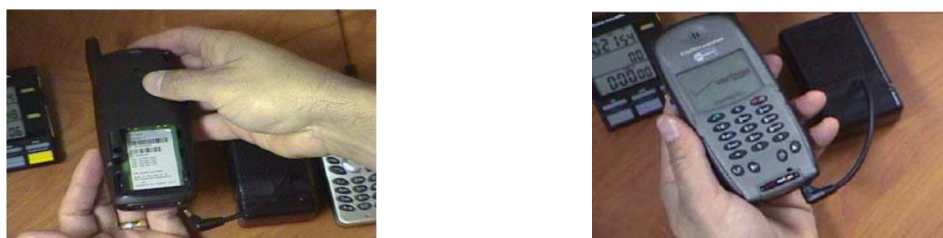


Fig. 48. Célula doble alimentando un teléfono móvil.

## Sistemas químicos: células de metanol e hidrógeno.

En la figura 49 se muestra un teléfono de la marca Motorola con sus cartuchos de recarga de metanol. Los principales objetivos son reducir el tamaño de las células y aumentar su densidad de energía, así como su autonomía. Para tal fin es necesaria la constante investigación en materiales para fabricar las capas de la célula y aumentar la catálisis.



Fig. 49. Teléfono Motorola alimentado con cartuchos de metanol.

**Celula de metanol de MTI Microfuel Cells:** esta empresa también ha desarrollado su célula DMFC con los siguientes resultados:

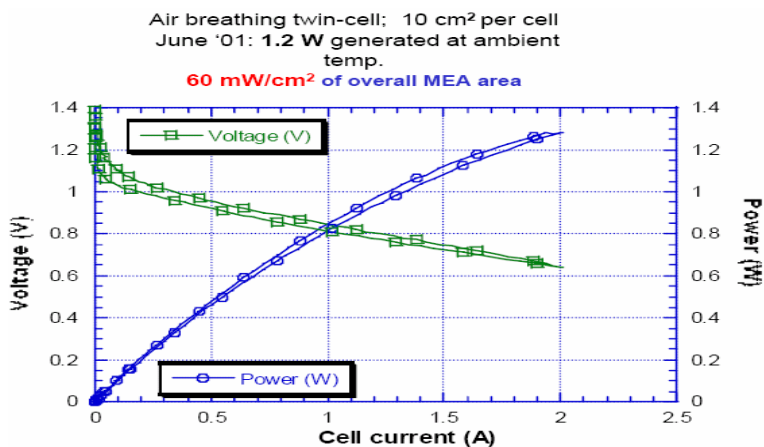


Fig. 50. Gráfico de potencia para la célula doble de MTI Microfuel Cells.



Fig. 51. Célula de MTI Microfuel Cells.

## Sistemas químicos: células de metanol e hidrógeno.

Con una célula doble de  $10 \text{ cm}^2$  por célula se es capaz de obtener un máximo de  $1,2 \text{ W}$ , suficiente para alimentar un teléfono móvil, agendas PDA, navegadores GPS y otros dispositivos similares.

**Célula del Laboratorio Nacional de Los Álamos (EE.UU):** esta célula DMFC esta formada por 30 células de una superficie de  $45 \text{ cm}^2$  cada una. Según el equipo encargado ha desarrollado hasta  $80 \text{ W}$  en condiciones ambientales. Se espera que sea capaz de desarrollar hasta  $200 \text{ W}$  a  $100^\circ\text{C}$  [31].

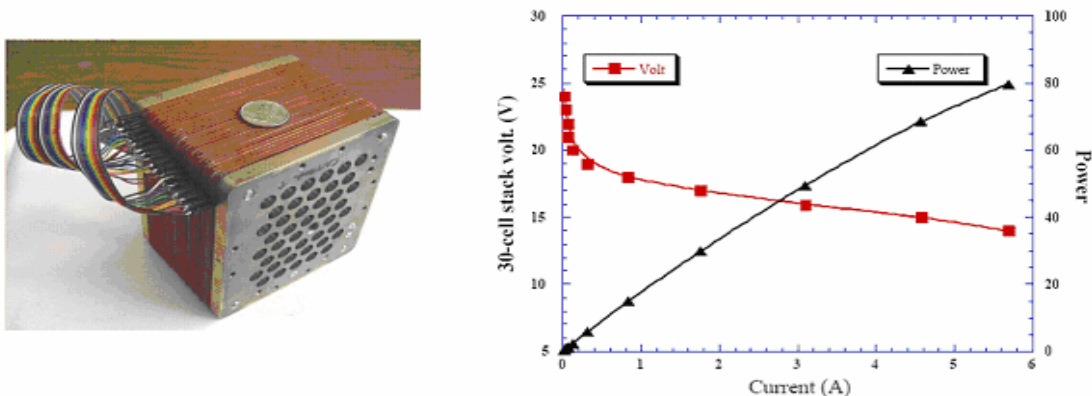


Fig. 52. DMFC de 30 células y resultados obtenidos a  $60^\circ\text{C}$  y  $0,76$  atmósferas de presión.

Con tal capacidad de salida se pueden alimentar un amplio abanico de objetos portátiles y no portátiles. A pesar de no tener datos del comportamiento de la salida con el tiempo, hay que decir que las células de combustible se introducirán en un futuro no muy lejano como sustitutas de las baterías convencionales.

**Sensores wireless:** en la figura 53 se observa un esquema de una posible red de sensores wireless, formada por la alimentación, sensores, sistema de transmisión y electrónica de control. Se prevé una vida operativa de 2 a 3 semanas con un consumo total de energía de unos  $50 \text{ mWh}$ . Se ha utilizado una célula única de  $1 \text{ cm}^2$  de área y un peso  $<0,2\text{g}$  de solución de  $\text{NaBH}_4$  al 30% [48]. Un sistema tan pequeño es capaz de trabajar en cualquier ámbito, incluido el cuerpo humano. Debido a su pequeño tamaño se puede introducir en casi cualquier ámbito para monitorizar parámetros a medir y transmitirlos a un receptor cercano.

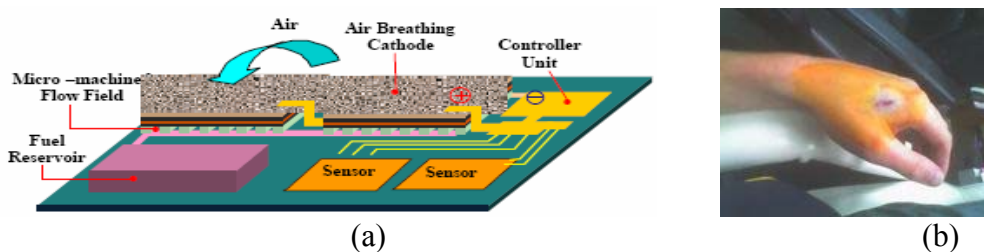


Fig. 53. (a) Red de sensores wireless; (b) Sistema RFID implantado en la mano.

**Aplicaciones en medicina:** campos como la medicina son de gran interés para el uso de las células de combustible. Reduciendo la masa del conjunto se podría alimentar todo tipo de implantes, como marcapasos o corazones artificiales. Se eliminarían las baterías y la dependencia de tener que cargarlas durante largos períodos. En casos más simples se podrían alimentar audífonos para las deficiencias auditivas. Estos elementos pueden ser analógicos o digitales, necesitando una pila de botón de mayor o menor tamaño en función de la capacidad del sistema. Esta pila ha de cambiarse por el médico o experto, con lo que puede haber un período de no utilización con el consecuente percalce para el paciente.

**Cepillo de dientes eléctrico:** estos sistemas utilizan en la actualidad una pequeña batería recargable y un diminuto motor para hacer vibrar las cerdas que limpian los dientes. Con el fin de evitar tener que acordarnos de ponerlo a cargar se puede cambiar la batería recargable por una pequeña célula de metanol. Solo necesitaríamos una reserva de este compuesto para llenar el depósito cada vez que se agote. Acompañando a la célula se pueden incluir otros sistemas, como dispositivos electromagnéticos que generen al agitar el cepillo. Dentro de este grupo de aparatos se incluyen también las máquinas de afeitar eléctricas portátiles donde poder incluir estos sistemas de alimentación.

**RFID tags:** las conocidas como RFID tags (Radio Frequency IDentification) son pequeños dispositivos muy utilizados para transmitir información. Pueden funcionar como transpondedores, lectores o en aplicaciones de software, e incorporarse en productos, animales o personas para su identificación. Generalmente están fabricadas en silicio, aunque existen otras de polímero semiconductor, más barato y fácil de imprimir.

Existen tres tipos de RFID tags: pasivas, semiactivas y activas. En el primer caso solo es necesaria la energía eléctrica inducida en su antena para alimentar el circuito CMOS y producir una respuesta. Esto se puede utilizar para enviar un número de identificación, como en los productos de un supermercado, o almacenar datos al incluirse una EEPROM, como en el caso de librerías y bibliotecas. También pueden introducirse en pasaportes, carnés de identidad o como implantes bajo la piel.

Las RFID tags activas tienen, por el contrario, su propia fuente de alimentación. Estos dispositivos se han utilizado como sensores de temperatura, humedad, vibración, luz o radiación. El departamento de defensa de los Estados Unidos las ha utilizado para reducir los costes de logística y mejorar las cadenas de alimentación de mercancías durante más de 15 años con éxito. También se han utilizado para la identificación de un vehículo respecto al pago directo de tasas en fronteras y carreteras de peaje sin necesidad de parar.

### **2.4.3.5 Conclusiones.**

Dentro de las posibles células de combustible que se han diseñado y construido, las DMFC de metanol y las células de hidrógeno tienen un especial interés en microgeneración. El metanol es un combustible en estado natural líquido, lo que hace factible su transporte en pequeños recipientes con el fin de repostar el dispositivo electrónico. A su vez tiene una alta disponibilidad para el usuario, relativo bajo coste y el tamaño de las células es bastante más pequeño que otras para la misma densidad de energía. Tienen por el contrario la desventaja de ser un combustible altamente inflamable y tóxico, lo que implica que se deben diseñar métodos de recarga para su fácil manipulación y unos depósitos muy seguros para no permitir fugas. Aún así se augura un gran futuro para este tipo de células, dado que estos combustibles tienen una capacidad energética por unidad de masa varias veces superior a la de las actuales baterías de ión-litio.

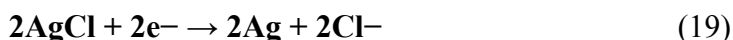
Las células de hidrógeno también auguran un gran futuro. Su potencial energético es de 2 a 3 veces el de las baterías de litio. También es superior al potencial de las células de metanol (unos  $20 \text{ mW/cm}^2$  para las de metanol y hasta  $170 \text{ mW/cm}^2$  para las de hidrógeno). En las células de hidrógeno, y en general en todas las células PEM, tiene gran importancia el agua para humidificar los gases reactivos y mantener la humedad en las membranas. También con esta humedad se consigue refrigerar la célula, manteniendo la temperatura de funcionamiento dentro de los límites adecuados. Un gran problema es el tamaño del depósito, ya que necesita estar encerrado a presión. Esto además provoca pérdidas de gas, lo que puede ser peligroso si reacciona con oxígeno. Por tal motivo se usa el hidrógeno en otros ambientes de mayor calado, como generación de energía para hogares y coches.

Las aplicaciones más demandadas para las DMFC de metanol son la alimentación de electrónica portátil de consumo (móviles, ordenadores portátiles, reproductores de música, etc). Se pueden aplicar en todos aquellos dispositivos que utilicen pilas como fuente de alimentación (mandos a distancia, juguets, cascos de música sin cables, etc). También se ha llegado a mover un coche mediante estas células, caso del Necar5 de Mercedes-Benz y otros tantos modelos.

### **2.4.3.6 Electricidad a partir de agua.**

#### **2.4.3.6.1 Principio de funcionamiento.**

El departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de California-Berkeley ha desarrollado una pequeña célula que genera electricidad al añadirle agua. La microcélula utiliza magnesio (Mg) para el ánodo en el sustrato superior y cloruro de plata (AgCl) o cloruro de cobre (CuCl) para el cátodo en el sustrato inferior. Las dos piezas están unidas por un adhesivo (pegamento instantáneo) para crear la cámara de reacción. Este pegamento forma las paredes de la cámara donde se introducirá el agua, permitiendo ésta el contacto químico entre el ánodo y el cátodo. Antes de añadir el agua no hay contacto entre el ánodo y el cátodo, por lo que no hay reacción. Esto hace que la célula pueda tener una larga vida debido al reducido número de cargas y descargas. Las reacciones de oxidación (18) y de reducción (19) son las siguientes, utilizando cloruro de plata como cátodo:



y la reacción global es:

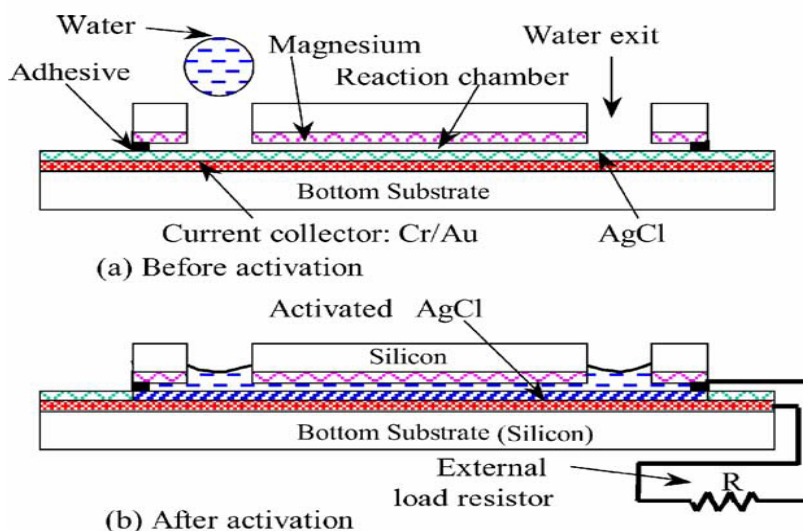


Fig. 54. Partes de la célula de agua y su funcionamiento.



## **Sistemas químicos: electricidad a partir de agua.**

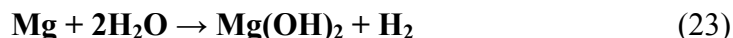
Si se utiliza cloruro de cobre como cátodo, la ecuación (19) se modifica de la siguiente manera:



y la ecuación general queda:



También ocurre una reacción secundaria entre el ánodo de magnesio y el electrolito acuoso, resultando la formación de hidróxido de magnesio, hidrógeno ambiental (hidrógeno diatómico) y calor:



La formación de burbujas de hidrógeno provoca una acción de empuje que ayuda a purgar el hidróxido de magnesio insoluble, ayudando así al funcionamiento de la batería.

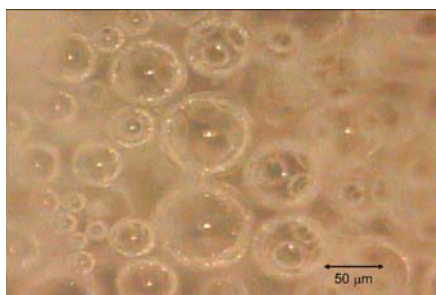


Fig. 55. Burbujas en la salida del puerto.

Se observa en las ecuaciones (1)-(5) que cuando los electrones circulan por la resistencia externa, iones como el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  circulan internamente por el electrolito.

### **2.4.3.6.2 Resultados obtenidos.**

Los responsables del proyecto midieron las tensiones de salida con respecto al tiempo bajo varias resistencias internas de descarga, áreas de los electrodos, materiales del cátodo y anchos de separación de la cámara de reacción. Comprobaron que añadiendo una gotita de aproximadamente 40  $\mu\text{l}$  en todos los experimentos se activaba el dispositivo [26].

El cloruro de plata fue según el experimento el compuesto con la tensión más alta durante los primeros 22 minutos debido a su mayor corriente de descarga (mayor conductividad). Pasado este tiempo, el cloruro de cobre realizado mediante impresión



obtuvo mejores resultados, dado que posee un relleno orgánico que le hace tener una resistencia interna más alta. Esto hace que se descargue más despacio.

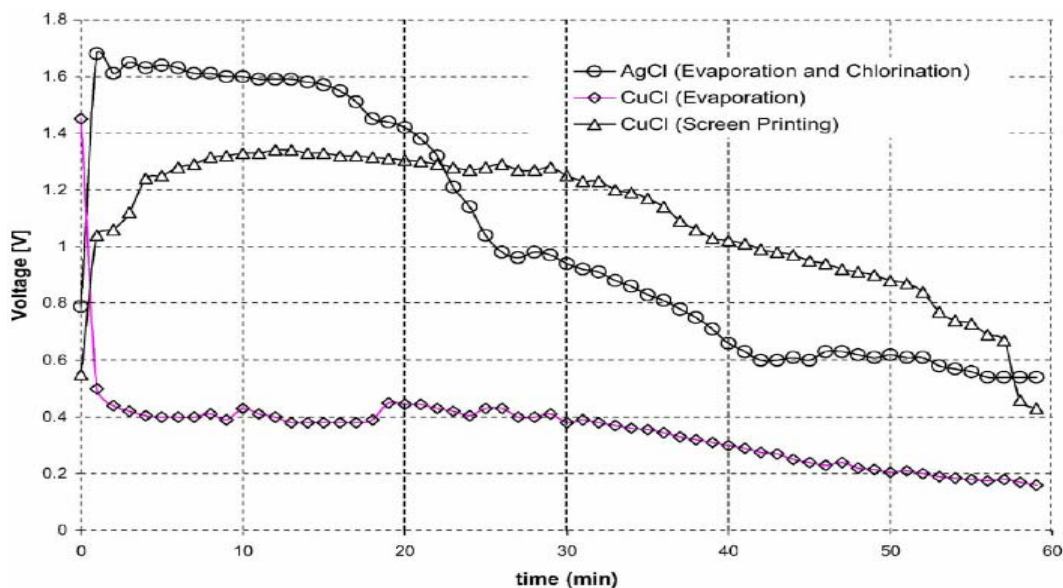


Fig. 56. Gráfico de tensión en una célula de 12 mm x 12 mm, cámara de reacción de 100  $\mu\text{m}$  y resistencia de carga de 1 k $\Omega$  para diferentes compuestos del cátodo.

En la figura 56 se ve como con una resistencia de carga de 1k $\Omega$  la tensión alcanza un máximo de 1.7 V después de un minuto de operación, y el valor se reduce a 0.46 V después de 25 minutos, manteniéndose alrededor de este valor durante el resto del proceso. El decremento de la tensión en el tiempo es debido al consumo químico interno. Como es lógico, el valor de tensión es menor si la resistencia de descarga es mayor. La medida de tensión podría ser expresada aproximadamente como:

$$V_m = (E_o + E_p)R / (R + R_i) \quad (24)$$

En esta ecuación,  $E_o$  es la tensión teórica,  $E_p$  es la caída de tensión debida a la reacción en la unión electrodo- solución,  $R$  es la resistencia de carga y  $R_i$  es la resistencia interna. Se deduce de la ecuación (24) que si la resistencia de carga aumenta, la tensión de descarga aumenta también.

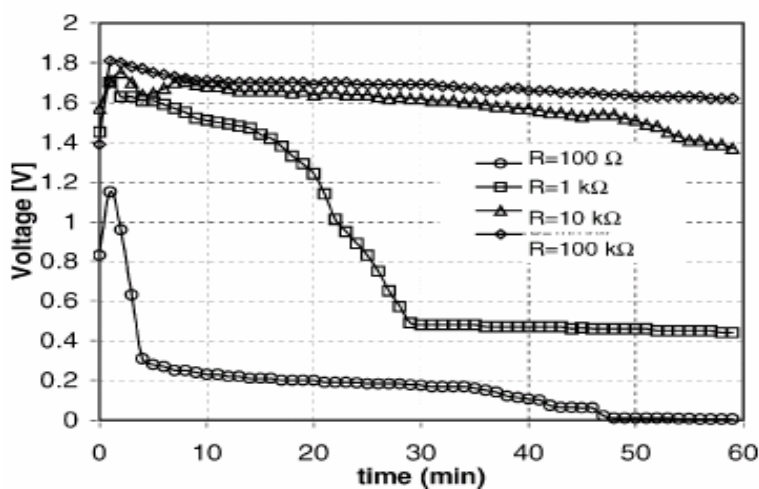


Fig. 57. Gráfico de tensión medida en una célula de 8mm x 8mm para distintos valores de carga, con una cámara de reacción de 100  $\mu$ m de alto y AgCl como cátodo.

La figura 58 muestra las curvas de descarga con una carga de 1  $k\Omega$  para varias áreas y AgCl como cátodo, con una altura de cámara de 100  $\mu$ m. Como se ve, la tensión decrece a menor área del electrodo porque las células con largas áreas de electrodo tienen menos resistencia interna.

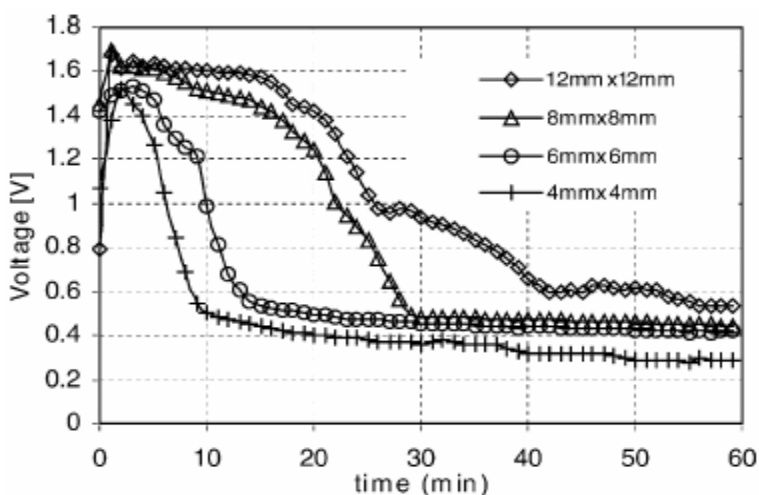


Fig. 58. Gráfico de tensión en el tiempo variando la superficie de los electrodos, con una cámara de reacción de 100  $\mu$ m de alto y AgCl como cátodo.

Este equipo también estudió la efectividad de la altura de la cámara de reacción en el rendimiento. En la figura 59 se puede observar que el rendimiento aumenta cuando la altura se reduce. Si el hueco entre el cátodo y el ánodo es menor, la resistencia del

## Sistemas químicos: electricidad a partir de agua.

electrolito dentro de la cámara de reacción se reduce. Esto resulta en una menor resistencia interna que consecuentemente mejora el rendimiento.

Como se mencionó anteriormente, se produjeron burbujas de hidrógeno en la salida del puerto durante el funcionamiento. Las burbujas son directamente consecuencia de la reacción química entre el magnesio y el agua. Esto tiene la desventaja de que el electrodo de magnesio va poco a poco erosionándose, de lo que resulta una menor tensión experimental y capacidad energética por unidad de masa en relación al valor teórico. Por otro lado, el movimiento de las burbujas en toda la cámara hasta la salida del puerto es beneficioso para impulsar la reacción y eliminar productos como  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CuCl}_2$  y  $\text{AgCl}_2$  hacia el exterior [26].

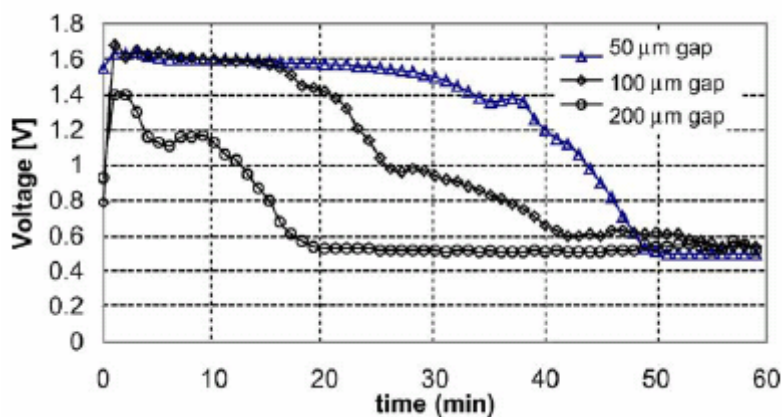


Fig. 59. Gráfico de tensión en el tiempo para distintas profundidades de la cámara de reacción, en una batería de 12 x 12 mm con una carga de 1 k $\Omega$  y AgCl como cátodo.

Electrode area (mm x mm)	Material	Gap ( $\mu\text{m}$ )	100 $\Omega$	1k $\Omega$	10 k $\Omega$	100k $\Omega$
12 x 12	AgCl	50	$\leftrightarrow$	1766.5		
12 x 12	AgCl	200	$\leftrightarrow$	543.6	$\downarrow$	$\downarrow$
12 x 12	AgCl	100	$\leftrightarrow$	1266.0		
8 x 8	AgCl	100	808,2	999.4	254.3	28.17
6 x 6	AgCl	100	$\leftrightarrow$	530.2		
4 x 4	AgCl	100	$\leftrightarrow$	337.4		
12 x 12	CuCl	100	$\leftrightarrow$	1260.6		
12 x 12	CuCl	100	$\leftrightarrow$	155.16		

Tabla 8.Capacidad de energía en mWh de la célula variando sus parámetros.

### **2.4.3.6.3 Fabricación.**

- En primera instancia se procede a fabricar los huecos en el ánodo por donde se introducirá el agua mediante una técnica llamada DRIE (Deep Reactive Ion Etching).
- Posteriormente se realiza la deposición del magnesio (15  $\mu\text{m}$  de grosor) en la parte inferior del sustrato de silicio.
- Ya en el elemento inferior se deposita sobre el sustrato de silicio una capa de cobre/ oro de 200 Å/ 2000 Å por un proceso de chisporroteo.
- Encima de la anterior se deposita una capa de plata de 20  $\mu\text{m}$  por el mismo proceso y después se añade cloro para formar el cátodo de AgCl. En el caso del CuCl se deposita una capa de 1,5  $\mu\text{m}$  mediante evaporación. Otra alternativa es depositar una capa de CuCl de 20  $\mu\text{m}$  mediante un proceso de impresión sobre el cátodo para aumentar la cantidad de compuesto, alargando así la vida de la célula.
- Para finalizar, ambos sustratos son unidos para formar la cámara de reacción. Se hicieron tres alturas diferentes para la cámara: de 50, 100 y 200  $\mu\text{m}$  mediante varios espaciadores de plástico en el proceso de unión. Además se fabricaron, como ya se mencionó, diferentes áreas de electrodo.

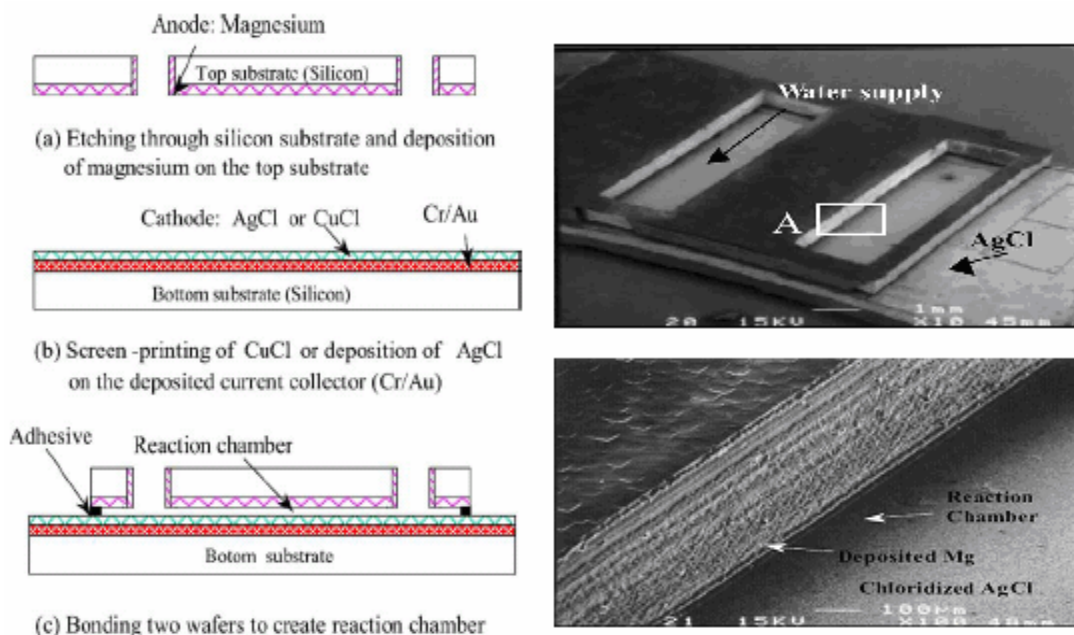


Fig. 60. Microcélula con un área de 8 x 8 mm; izquierda: partes del proceso de fabricación; derecha superior: vista aérea; derecha inferior: sección de la misma, con sus electrodos y cámara de reacción.

**2.4.3.6.4 Aplicaciones prácticas.**

En el mercado hay actualmente productos que funcionan con agua (relojes, calculadoras, etc). Los materiales utilizados en la reacción pueden ser diferentes, ya que los fabricantes utilizan sus propios materiales, que son mantenidos en secreto y protegidos bajo patente. Aún así el principio de funcionamiento es el mismo y, desde luego, el componente para el electrolito es simplemente agua del grifo.



Fig. 61. Calculadora con batería de agua [55].

También se está pensando incluir este sistema en medicina para alimentar pequeños chips implantados en el cuerpo. El cuerpo humano es un proveedor excepcional de agua, con lo cual se evita la utilización de un depósito para contenerla. Algunas de las posibilidades pueden ser chips de diagnóstico, para hacer el seguimiento de enfermedades, investigación de problemas de salud en el tiempo (para lo cual es imperativo mejorar la durabilidad y la densidad de potencia), pruebas de ADN, etc.

Otras posibilidades apuntan al uso de estos sistemas en sensores de medición de parámetros en campos agrícolas, tales como temperatura, humedad, radiación solar, etc. Manteniendo el sistema con el agua del riego se asegura el funcionamiento en el tiempo.

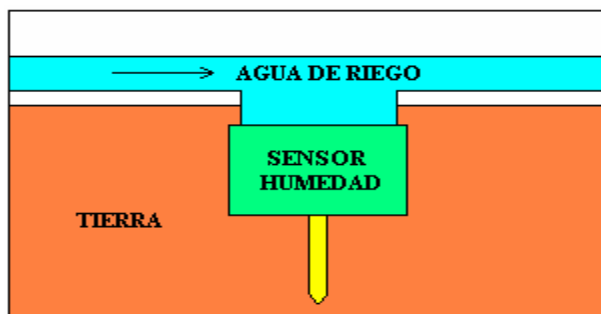


Fig. 62. Sensor de humedad alimentado por agua.

**2.4.3.6.5 Conclusiones.**

Ha quedado demostrado que con una pequeña “célula generadora”, que usa magnesio como ánodo y cloruro de plata o de cobre como cátodo (otros materiales, pueden proporcionar incluso mejores resultados) se consigue una cantidad suficiente de energía para alimentar pequeños chips. La tensión máxima de salida es de 1.65 V, con una capacidad de energía de casi 1.8 mWh para un área de electrodo de 12mm x 12mm y una carga de 1 k $\Omega$ , cuando el hueco de la cámara de reacción entre ánodo y cátodo es de 50  $\mu$ m. Se activa con una gotita de agua de 40  $\mu$ l. Así se reduce la cámara y se incrementan las áreas de los electrodos para conseguir mayores tensiones de salida.

Este sistema tiene un proceso de fabricación muy sencillo (solo requiere una máscara) y es compatibles con la mayoría de procesos para microelectrónica, incluyendo CMOS. Puede ser fácilmente integrado en microsistemas para varias aplicaciones.

En este caso, el mayor problema viene por la rápida caída de tensión a la salida. Esto hace que se tenga que replantear la utilización de ciertos materiales en los electrodos. Al utilizar materiales alcalinos se produce un acortamiento de la vida por la paulatina descomposición de éstos (formación de dióxido de magnesio), que hace descender poco a poco el rendimiento del sistema.

### **2.4.3.7 Electricidad mediante glucosa.**

#### **2.4.3.7.1 Introducción.**

El aprovechamiento de las reacciones químicas internas del cuerpo para generar energía ha sido desde siempre un objetivo ambicionado por el hombre. La glucosa es en este sentido la principal responsable de dotar de energía a los músculos de nuestro cuerpo durante el esfuerzo. Por ello algunos investigadores han intentado crear sistemas que funcionan con glucosa con vistas a su integración en chips médicos que midan niveles de azúcar y otros parámetros, a fin de conocer con mayor exactitud las tendencias de enfermedades como la diabetes.

Las investigaciones en células de glucosa datan de los años setenta por la necesidad de sustituir las baterías de óxido de mercurio- zinc usadas hasta entonces. Estas células se utilizaban para alimentar marcapasos cardiacos, pero eran cambiadas frecuentemente dada su corta vida. Las células de glucosa alcanzaban una potencia de hasta 50  $\mu\text{W}$ , suficiente para alimentar ciertos marcapasos. Fueron probadas en animales con una duración de más de 150 días, aunque su biocompatibilidad no fue totalmente probada. Tras estos resultados se ha continuado investigando en este campo a pesar de la aparición en 1970 de las baterías de litio para marcapasos, con una vida mínima de cinco años. El objetivo a medio-largo plazo es eliminar totalmente el recambio de las células que alimentan sistemas biomédicos, evitando cualquier rechazo con el cuerpo. Es el propio cuerpo quien proveerá de glucosa al sistema para no depender de sistemas de alimentación externos.

#### **2.4.3.7.2 Principio de funcionamiento.**

Aquí se presenta una célula desarrollada por la Universidad de Freiburg (Alemania) con vistas a su aplicación en implantes de larga duración. Esta célula consta de un ánodo de platino, donde se oxida la glucosa y dos cátodos para la reducción del oxígeno. Teóricamente se pueden obtener hasta 24 electrones de la oxidación directa de una molécula de glucosa, pero ésta es transformada en ácido glucónico, produciendo solo 2 electrones.

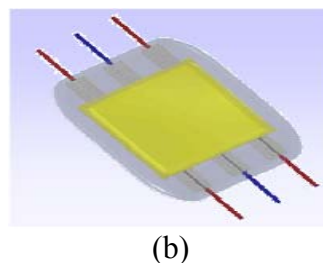
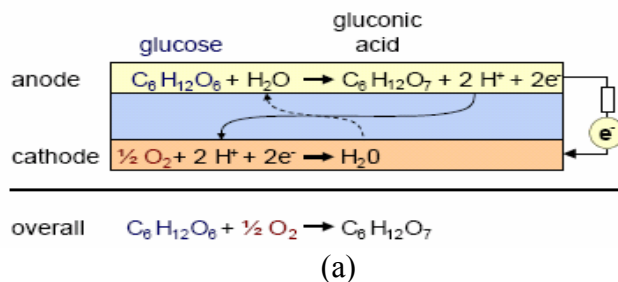


Fig. 63. (a) Reacciones en ánodo y cátodo; (b) Foto de la célula.



## Sistemas químicos: electricidad a partir de glucosa.

En “fuel cells” convencionales, el combustible y el oxígeno se envían por separado al ánodo y cátodo respectivamente. En este caso tenemos una batería que debe tomar ambos elementos de un fluido fisiológico en el que esta inmerso. Mientras el catalizador selectivo para la reducción del oxígeno en presencia de glucosa esta disponible, no pasa lo mismo con el catalizador de la glucosa en presencia de oxígeno. Sin este catalizador selectivo, la glucosa transferiría sus electrones al oxígeno disponible y no habría circulación de corriente. Se establece para ello una región anaeróbica que rodea el ánodo. Esta región esta hecha a base de polímero de hidrogel, que es capaz de absorber cientos de veces su peso en agua (formado por alcohol de polivinilo y ácido poliacrílico). Este material recubre y separa los electrodos de área  $2,2 \times 2,2 \text{ cm}^2$ , absorbiendo la humedad generada tras la reducción, que se aprovechará posteriormente en la oxidación. Además, el hidrogel sirve de aglutinante del carbón en los electrodos. Éstos están compuestos, a su vez, de carbón revestido con una fina capa de platino (catalizador). El ánodo contiene un 10% de platino adicional. Un cerco de resina epoxi aísla eléctricamente las conexiones de los cables y protege la zona adiabática del ánodo.

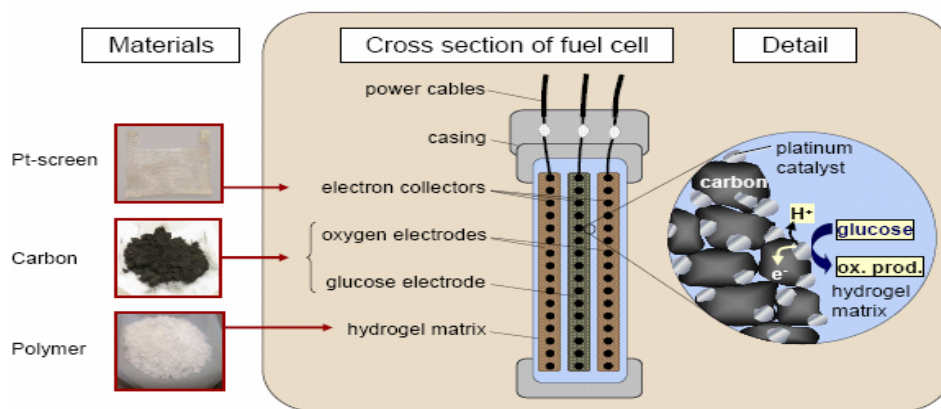


Fig. 64. Sección de la célula. Detalle del ánodo y la matriz de hidrogel.

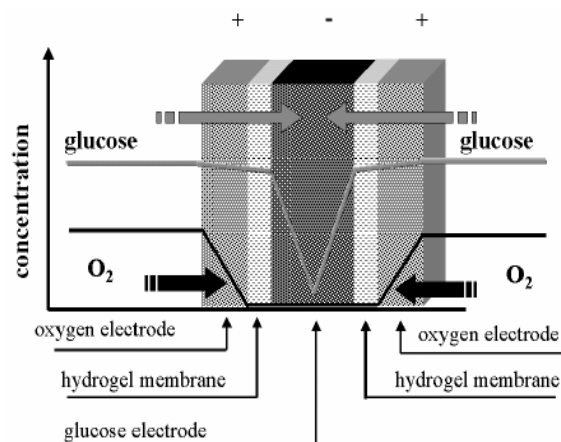


Fig. 65. Estructura de la célula.



**2.4.3.7.3 Resultados obtenidos.**

El equipo encargado del proyecto calentó fosfato fisiológico (pH de 7,4) en un recipiente hasta los 37°C e introdujo la célula en él. La célula contenía glucosa con un 0,1% de humedad. Como puede verse en los gráficos de abajo, se obtuvo unas densidades de hasta 2  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  por un periodo de 7 días, que corresponden a 20  $\mu\text{W}$  de potencia de pico para una superficie de cátodo de 10  $\text{cm}^2$  (las áreas superficiales de los electrodos son de 2,2 x 2,2  $\text{cm}^2$ ), según el equipo responsable, suficiente para alimentar un marcapasos. Pasado este tiempo, la potencia a la salida cayó paulatinamente, generando más de 1  $\mu\text{W}$  durante más de 26 días a 400 mV, debido presumiblemente a la oxidación del platino [29].

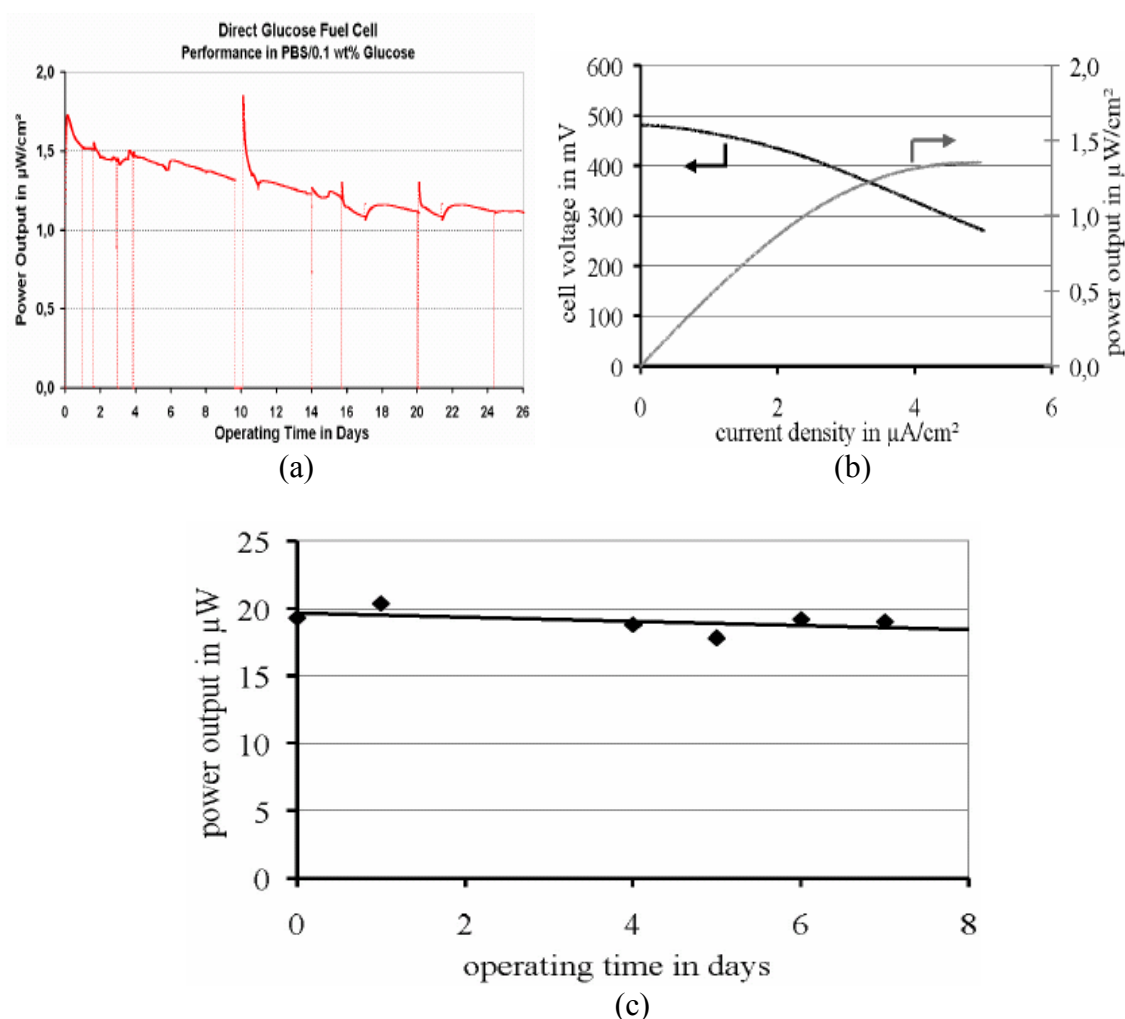


Fig. 66. (a) Gráfico densidad de potencia-tiempo de operación; (b) Gráfico tensión-densidad de corriente- densidad de potencia; (c) Gráfico de potencia total de salida durante una semana.

**2.4.3.7.4 Fabricación.**

Por una parte se realizan las membranas de hidrogel a partir de una solución de éste al 3% de humedad. Los electrodos se realizan untando tinta sobre el ánodo de platino con una “hoja de doctor” (esta tinta consiste en carbón activo saturado en una solución de hidrogel al 7%). Una vez hecho esto se empotran los colectores de electrones sobre el ánodo con esta tinta, que los aglutina y aísla.

Después de un período de secado para que el hidrogel pierda la humedad se procede a unir los electrodos con las membranas que forman la célula mediante pegamento húmedo, para posteriormente comprimir el conjunto y calentarlo a 145°C durante 40 minutos. Finalmente, los cables se conectan a los contactos de los electrodos y se protege la célula con una capa de resina epoxi.

En la figura 67 (c) pueden verse un esquema de las partes del microgenerador. En el centro (d) puede verse la célula rodeada de un anillo de silicona (c). Todo el conjunto esta encerrada por una carcasa de cristal (b). La parte inferior y superior de la célula quedan sujetas a un chasis de teflón (a), dejándose un hueco para la salida de los contactos de los electrodos y otra para la entrada de nitrógeno ambiental. A los lados quedan las soluciones de glucosa.

Este tipo de sistemas son actualmente motivo de investigación, por lo que el sistema de fabricación y los materiales utilizados pueden cambiar.

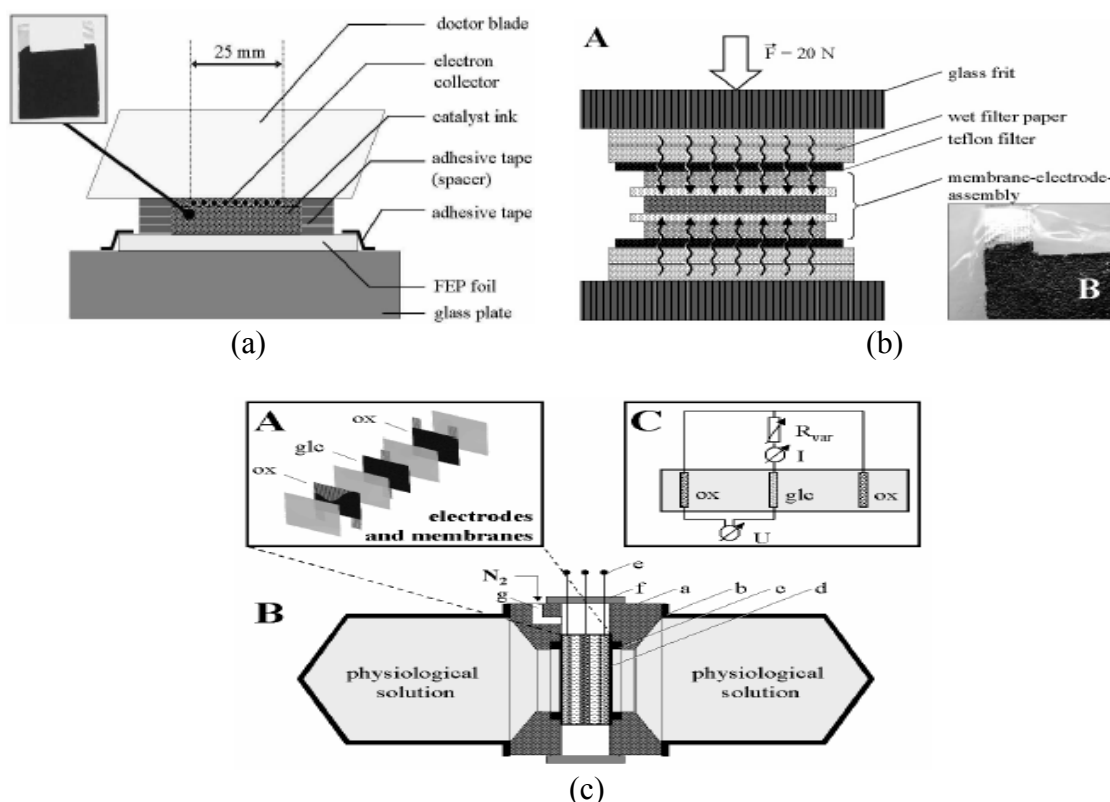


Fig. 67. (a) Fabricación del electrodo de la célula de combustible; (b) Ensamble de electrodos y membranas; (c) Vista lateral de la célula terminada.

**2.4.3.7.5 Aplicaciones.**

Entre los posibles empleos que se le pueden dar a un dispositivo de las características mencionadas están las siguientes [29]:

- Dispositivos de diagnóstico médico en humanos y animales para el estudio de alteraciones, enfermedades, etc.
- Dispositivos para el estudio de compatibilidad de materiales en ortopedia.
- Aplicaciones en micro y nanotecnología.
- Aplicaciones generales de las microcélulas de combustible (alimentación de reproductores Mp3 y otros dispositivos).

Se han desarrollado a modo de prueba en aplicaciones generales de células de combustible algunos proyectos, como ventiladores, baterías estancas que alimentan teléfonos portátiles, etc.

Como aplicación práctica se presenta un pequeño ventilador, que no es más que un ejemplo de las posibilidades de utilización de la glucosa como combustible en pequeños aparatos de uso cotidiano.

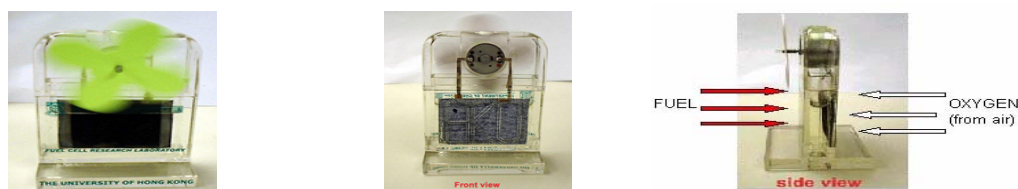


Fig.68. Distintas vistas de un ventilador alimentado con glucosa.

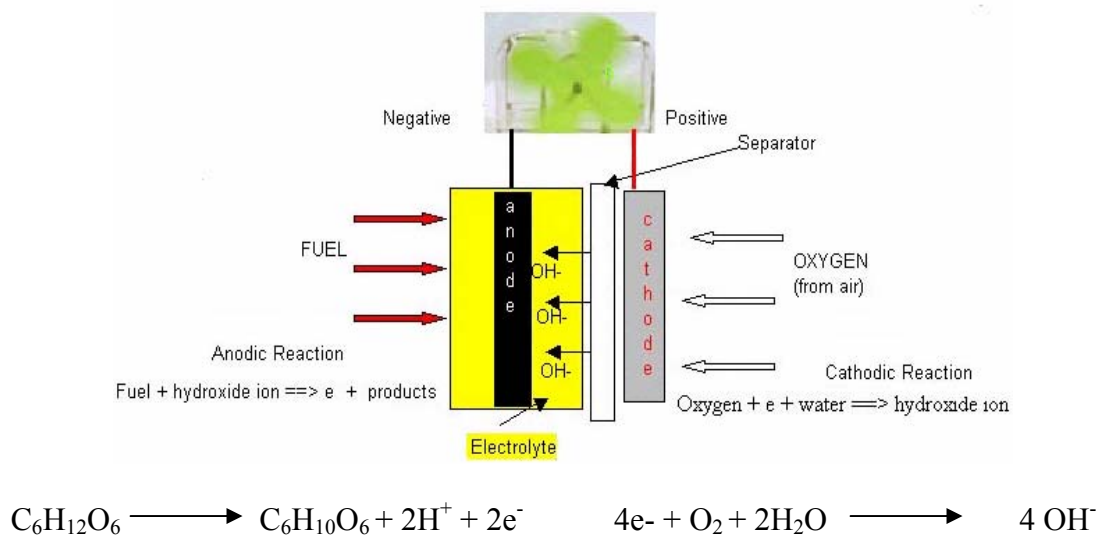


Fig. 69. Esquema de funcionamiento del ventilador.

### **Sistemas químicos: electricidad a partir de glucosa.**

Este ventilador puede utilizar varios tipos de combustible, como glucosa, metanol, etanol, almíbar,  $\text{NaBH}_4$ , láminas de aluminio o cobre, etc. Necesita como electrolito KOH o NaOH, con una tensión en circuito abierto de 0,9V. La autonomía mínima es de al menos 10 horas (depende del combustible añadido). Se vende por unos 80 dólares US.

Más recientemente ha aparecido en las noticias de ámbito tecnológico el desarrollo por parte de Sony de una biocélula de 39 mm de lado, que entrega hasta 50 mW de potencia. Esta célula se utilizó a modo de prueba para mover un ventilador, utilizando como combustible una bebida deportiva basada en azúcares. En otra de las pruebas se consiguió hacer funcionar un Walkman a partir de cuatro de estas células conectadas en serie. Sony ya ha indicado su intención de introducirlas en sus reproductores Mp3 [63].

Una de las ventajas de estos microgeneradores es la posibilidad de aumentar la potencia global añadiendo más células. En la figura 70 puede verse un sistema que funciona con glucosa. Tiene un total de 10 células de combustible conectadas en serie, con una salida máxima entre 0,5 y 1 W de potencia. La tensión en circuito abierto varía entre 4 y 9 V, pudiéndose utilizar de forma estacionaria o portátil (teléfonos portátiles, coches de juguete, etc.)



Fig. 70. Generador de glucosa.

### **2.4.3.7.6 Conclusiones.**

Este tipo de dispositivos son grandes promesas de futuro, sobre todo en el campo de la medicina. Su facilidad de integración, salida de corriente continua y gran estabilidad le proporcionan un puesto de privilegio para instalarse en implantes de bajo consumo, ya que la densidad de energía de estos biocombustibles está entre 0,1 y 100  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Por otro lado cabe destacar su relativamente baja durabilidad, debida a la rápida oxidación del catalizador, generalmente platino, lo que exige la utilización de otros posibles catalizadores, como es el caso de enzimas. Esto a su vez presenta el inconveniente de tener que instalar el dispositivo en lugares ricos en enzimas o disponer de ellas de alguna otra forma, como en el caso de los antibióticos. Además de ello, las enzimas presentan poca estabilidad en disolventes orgánicos y altas temperaturas [28]. Por éste y otros motivos se investiga en el desarrollo de enzimas con las propiedades adecuadas para el medio en que interaccionarán.

**2.4.3.8 Electricidad mediante orina.**

**2.4.3.8.1 Introducción.**

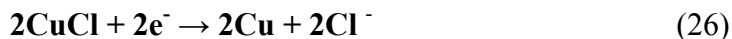
A modo de curiosidad se presenta este proyecto del Instituto de Bioingeniería y Nanotecnología de Singapur, en el que el equipo responsable fabricó una célula de combustible capaz de obtener electricidad a partir de orina. Este tipo de célula tiene el mismo principio de funcionamiento que la de agua expuesta anteriormente.

La orina es un líquido acuoso transparente y amarillento, de olor característico, excretado por los riñones. El ser humano elimina aproximadamente 1,4 litros de orina al día. Cerca de la mitad de los sólidos que contiene son urea ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), principal producto de degradación que se produce en el metabolismo de proteínas en los alimentos. Debido a su alto contenido en nitrógeno, la urea preparada comercialmente se utiliza en la fabricación de fertilizantes agrícolas. También se utiliza como estabilizador en explosivos de nitrocelulosa y es componente básico de resinas preparadas sintéticamente. El resto incluye sodio, cloro, amonio (derivado del amoníaco por adición de un ión hidrógeno ( $\text{NH}_4^+$ )), creatinina (sal interna de la creatina, de fórmula  $\text{C}_4\text{H}_7\text{N}_3\text{O}$ ), ácido úrico ( $\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3$ ) y bicarbonato (sales derivadas del ácido carbónico que contiene el anión  $\text{HCO}_3^-$ , siendo el más importante el bicarbonato sódico). Un litro de orina contiene normalmente agua, 10 mg de cloruro de sodio y dos productos tóxicos: la urea (25 g) y el ácido úrico (0,5 g) [28].

**2.4.3.8.2 Composición y principio de funcionamiento.**

Los componentes que forman esta célula activada por orina son: una capa de cobre (Cu), papel de filtro de cloruro de cobre ( $\text{CuCl}$ ) y una capa de magnesio (Mg). Todo el sistema queda encerrado entre dos capas de plástico. Para laminarlo en capas finas se hace pasar por unos rodillos calientes a  $120^\circ \text{C}$ .

El magnesio y el cloruro de cobre se usan como ánodo y cátodo respectivamente. La capa de cobre actúa como capa colectora de electrones para el cátodo. Cuando se añade una gota de orina humana, ésta penetra entre las capas de magnesio y  $\text{CuCl}$ . Es entonces cuando se produce el traspaso de cargas entre las capas. Las reacciones químicas en el ánodo (oxidación) y el cátodo (reducción) son respectivamente:



y la reacción global es:



Como puede comprobarse son las mismas reacciones que en el caso de las baterías de agua, ya que el principal componente de la orina es precisamente agua.

### 2.4.3.8.3 Resultados obtenidos.

La tensión teórica de esta batería es una función directa de los materiales del ánodo y del cátodo. El potencial estándar se cifró en 2,49 V, suma de los potenciales de ánodo y cátodo [27].

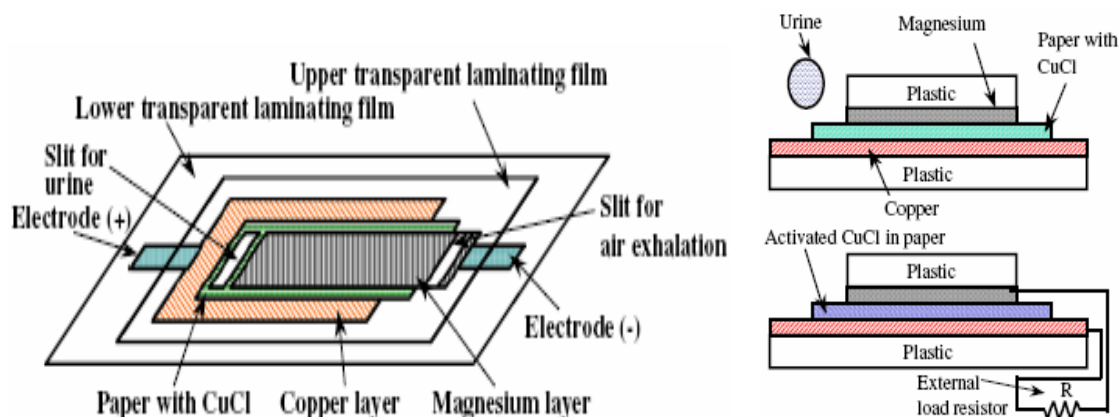


Fig 71. Composición de una célula de orina.

La tensión de salida de 10 células fue medida con respecto al tiempo para resistencias de 1 k $\Omega$  y 10 k $\Omega$ . La figura 72 muestra los resultados de tensión medidos en dichas resistencias después de añadir una gota de 0,2 ml. La tensión máxima a la salida con resistencia de 10 k $\Omega$  alcanza los 1,47 V, reduciéndose con el tiempo hasta mantenerse en los 1,04 V durante 90 minutos. La salida con una resistencia de 1 k $\Omega$  alcanza una tensión máxima de 1,21 V, bajando hasta 0,72 V después de 90 minutos. La máxima potencia es de 1,5 mW para 1 k $\Omega$  y 0,22 mW para 10 k $\Omega$ . Se demostró que al añadir otra gota de orina después de 90 minutos, la célula recobró la mayor parte del nivel de tensión original. Hay que decir que el tiempo de vida de esta célula es bastante corto, dado que va perdiendo rendimiento conforme los ácidos de la orina desgastan la capa de magnesio.

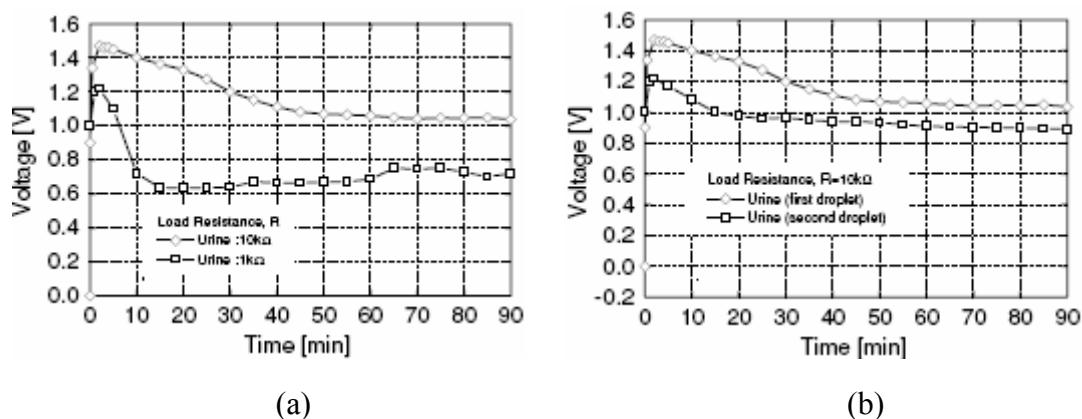


Fig 72. (a) Gráfico de tensión de salida para 0,2 ml de orina añadida y resistencias de 1 y 10 kΩ; (b) Comparación entre tensiones de salida para la carga de 10 kΩ tras la primera y la segunda adición de orina, pasando entre ambas 15 horas.

Carga (kΩ)	Tensión	1	2	3	4	5	Media
10	Tensión Max	1,47	1,46	1,45	1,47	1,45	1,46
	Tensión en 90 min	1,03	1,01	0,99	1,04	1,02	1,02
1	Tensión Max	1,21	1,23	1,20	1,18	1,20	1,20
	Tensión en 90 min	0,72	0,76	0,75	0,70	0,73	0,73

Tabla 11. Tensiones obtenidas en función del tiempo y del valor de la carga para 5 muestras.

#### **2.4.3.8.4 Fabricación.**

La fabricación comienza en (a) con la estampación de la capa de cobre sobre una capa de plástico transparente con superficie adhesiva. En (b) se estampa una capa de aluminio para los electrodos de 0,2 mm. En la etapa (c) se coloca el papel de filtro con CuCl (0,1 mm) para formar el cátodo. En la preparación previa del papel de filtro

comercial se ha procedido a empapar éste con una solución de  $\text{CuCl}$  en agua (3g en 100 ml). Después se ha dejado secar al aire y se ha cortado el papel en trozos con el tamaño requerido para su implantación. Tras la colocación del papel se posiciona la capa de magnesio (ánodo). Acto seguido se incluye otra capa de plástico arriba de todo y se hace pasar por unos rodillos calientes, dejándose unos huecos para la aplicación de la orina y la exhalación de gases al exterior producidos en la reacción.

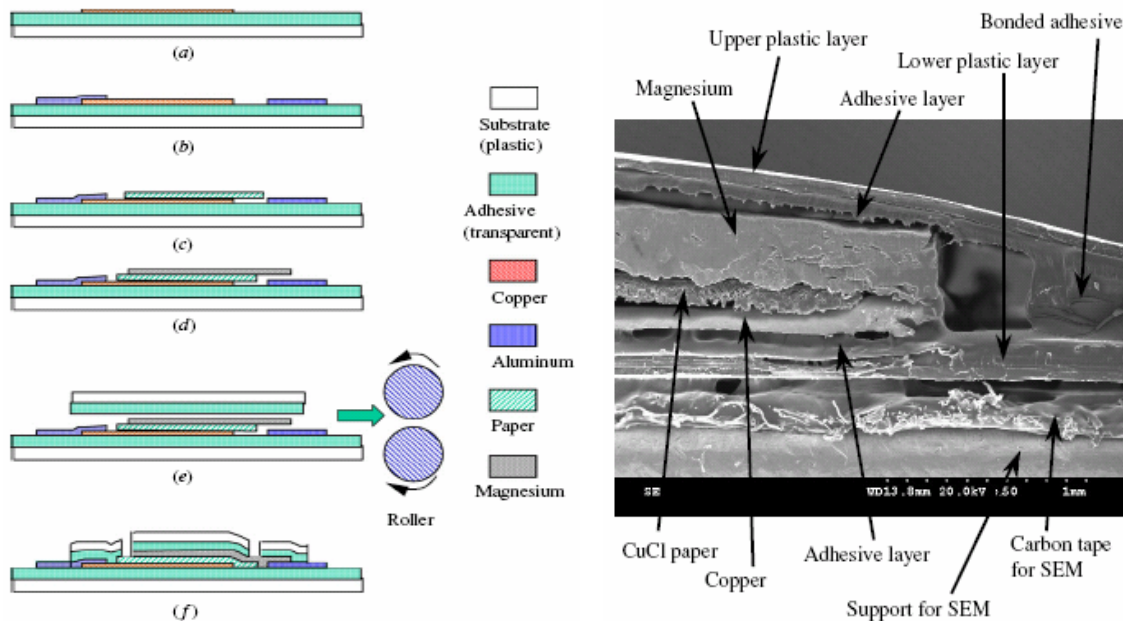


Fig 73. Izquierda: proceso de fabricación de la célula. Derecha: sección de la misma mediante fotografía ampliada.

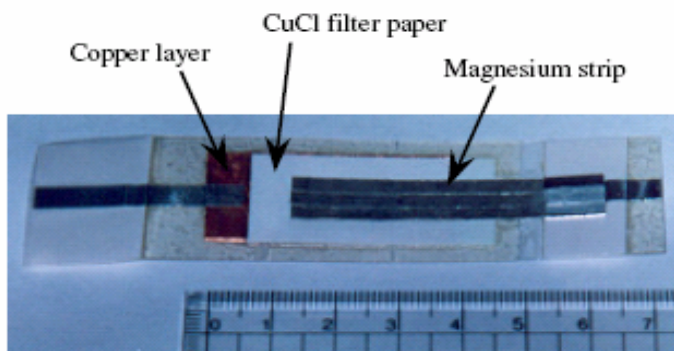


Fig 74. Célula de orina terminada.



### **2.4.3.8.5 Conclusiones.**

Ha quedado demostrado que este tipo de ingenios pueden ser muy útiles en un futuro, dado su bajo coste de fabricación y pequeño tamaño. La microcélula presentada obtuvo una tensión máxima de salida de 1,47 V y una potencia máxima de 1,5 mW en una carga de 1 k $\Omega$  [27]. Además, estas características se obtuvieron con solo añadir 0,2 ml de orina como electrolito, lo que asegura un nivel adecuado durante un tiempo prudencial, perfecto para aplicaciones médicas y estudio de enfermedades. Su utilización en sistemas para medir alteraciones en la orina o de otro tipo mediante la alimentación de un chip de diagnóstico es una posibilidad no muy lejana. Quizá el mayor inconveniente sea la rápida pérdida en el nivel de tensión durante periodos prolongados (días). Este hecho y el bajo precio de fabricación probablemente desemboque en sistemas de usar y tirar.

## 2.4.4 SISTEMAS ELECTROMAGNÉTICOS.

### 2.4.4.1 Introducción. Electricidad por inducción magnética.

Los generadores magnéticos basan su funcionamiento en el descubrimiento de Michael Faraday (1831), por el cual una variación de flujo magnético en un circuito cerrado que se desplaza a través de él genera una corriente eléctrica. Esto se consigue, por ejemplo, montando el circuito en un eje que gira dentro de un campo magnético creado por dos imanes (inducción magnética).

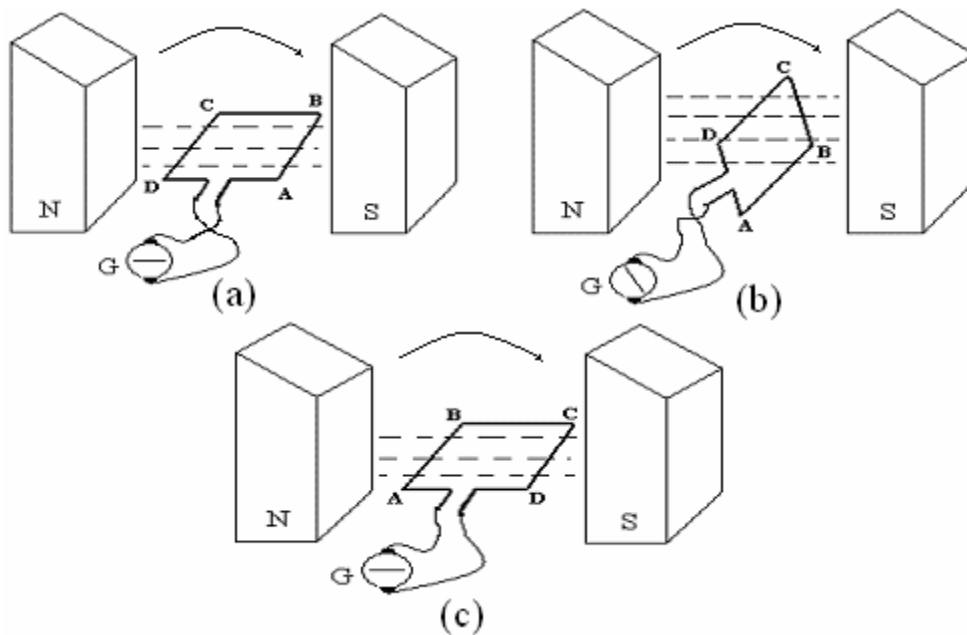


Fig. 75. Esquema de inducción de corriente en una espira mediante el giro de ésta.

Como puede verse en la figura 75, tenemos un hilo de cobre cerrado formando un circuito cerrado con el galvanómetro (aparato para detectar el paso de corriente eléctrica). Si se hace girar la espira en la dirección de la flecha dentro de un campo magnético (dentro de un imán de herradura por ejemplo), no se creará en el caso de (a) una corriente eléctrica, ya que el flujo se encuentra la espira de canto y pasa rozando sus caras sin pasar por su interior. Si giramos un cuarto de vuelta (caso (b)) ocurre todo lo contrario. En este caso el flujo atraviesa toda la superficie interior de la espira, con lo que la corriente apreciada es máxima. Si giramos otro cuarto de vuelta vuelve a ocurrir lo mismo que en (a) (caso (c)). Este fenómeno, llamado de inducción, es así porque la variación del flujo al girar la espira induce una corriente en ella. Si en vez de una espira tuviéramos muchas, la corriente global inducida sería mayor, teniendo mucha importancia la velocidad del giro, ya que la variación del flujo se producirá más deprisa. Esto es así en dinamos

(generadores de corriente continua) y en alternadores (generadores de corriente alterna). También se consigue el mismo objetivo girando el imán dentro de una bobina.

Otra posibilidad es realizar un movimiento lineal del imán en el seno de la espira, variándose también el flujo de campo eléctrico en su área. Si en el interior de la bobina metemos rápidamente un imán por su polo norte, la aguja de un galvanómetro se desviará por ejemplo hacia la derecha y al sacar el imán lo hace hacia la izquierda. Si luego introducimos el imán por el polo sur, la aguja se desviará hacia la izquierda y al sacarlo hacia la derecha, es decir, la fuerza electromotriz (f.e.m.) de inducción tiene un sentido que depende a la vez del sentido del movimiento del imán y de la naturaleza del polo aproximado a la bobina. A la vez esa f.e.m. de inducción aumenta con la velocidad de movimiento del imán. En este caso el valor de la inducción magnética **B** tendrá el valor de la expresión (27), siendo **N** el número de espiras, **l** la longitud de la bobina, **i** la corriente que lo atraviesa y **μ** el valor de la permeabilidad magnética del medio que constituye el núcleo del devanado:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu \mathbf{N} \mathbf{i}}{l} \quad (27)$$

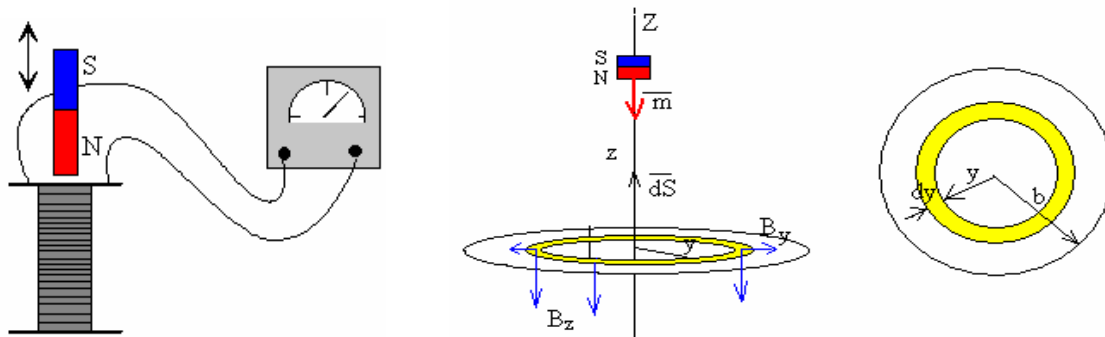


Fig. 76. Generación de energía mediante movimiento lineal de un imán en una bobina.

### 2.4.4.2 Composición y funcionamiento de una dinamo.

Las dinamos son generadores de corriente continua, y en ellos hay que distinguir tres partes esenciales: el inductor, el inducido y el colector.

El inducido está formado por un núcleo de placas de hierro dulce que forman un solo haz llamado núcleo del inducido, el cual concentra a todas las líneas de inducción que, partiendo de las piezas polares, atraviesan el entrehierro. Sobre este núcleo del inducido va el devanado, formado por una serie de espiras arrolladas sobre él, las cuales van conectadas entre sí y con el colector.

El colector debe su nombre a la misión de recoger o coleccionar las corrientes inducidas producidas en las espiras del inducido, pues de no existir este colector se

## Sistemas electromagnéticos.

anularían éstas por las corrientes procedentes de la mitad superior de las espiras del inducido, de un sentido, y las de la otra mitad, de sentido contrario. El colector lleva unas piezas llamadas delgas, aisladas entre sí, y hechas de cobre, sobre las que se apoyan las escobillas. De las escobillas sale la corriente al circuito exterior.

El funcionamiento de la dinamo se basa en que al hacer girar el devanado, el flujo magnético atraviesa las espiras de éste en el inducido, de modo que el plano de las espiras forma un ángulo variable con la dirección de la inducción magnética y, por lo tanto, las corrientes inducidas pasan por valores que oscilan entre un máximo positivo, cero, y un mínimo negativo; pero como las corrientes de sentido contrario son de espiras separadas por el plano de las escobillas, éstas en las delgas son recogidas separadamente evitando su anulación gracias al colector. Así pues, cada escobilla forma un polo positivo o negativo que suministra corriente al circuito exterior.



Fig. 77. Dinamo de la marca Fadisel y sus características [44].

<b>POTENCIA</b>	1,1 W
<b>TENSIÓN</b>	12V
<b>RESISTENCIA</b>	131 Ohm
<b>CORRIENTE</b>	90 mA
<b>TIEMPO "ON"</b>	Indefinido
<b>AMPER X VUELTA A 20°C</b>	198
<b>BOBINADO</b>	2162 espiras
<b>CABLES</b>	UL1571 AWG28, 100 mm.
<b>PESO TOTAL</b>	10 g.
<b>PESO DEL ÉMBOLO</b>	2 g.

### 2.4.4.3 Sistemas comerciales y proyectos.

Podemos pues aprovechar la energía de un campo magnético en forma de corriente inducida en una espira o en un devanado. La forma de recavar energía eléctrica mediante vibraciones se basa básicamente en dos topologías: mediante movimiento giratorio, bien del devanado o del imán, o mediante un movimiento lineal de éste en el seno de la bobina.

A continuación se presentan algunos proyectos de investigación para estos dispositivos y algunos ingenios comerciales:

### Generación a partir de movimiento lineal (vaivén).

**Primer proyecto:** en este primer ejemplo de microgenerador, llevado a cabo en la Universidad China de Hong Kong, consiste en un sistema que aprovecha las vibraciones externas para mover su imán permanente, ubicado en el interior de una bobina plana de cobre, fabricada con técnicas láser para desarrollo de microestructuras [13]. Este pequeño generador es capaz de alimentar un sensor que mide temperatura, y un modulo de transmisión wireless para enviar la información a un receptor hasta un máximo de 25 metros.

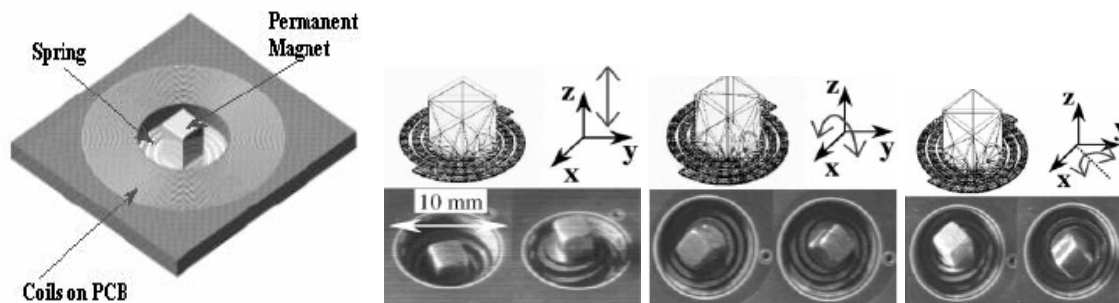


Fig. 78. Imágenes por ordenador del dispositivo generador.

Las pruebas de laboratorio utilizando un vibrómetro para observar la respuesta del sistema consiguen que la masa del imán vibre horizontal y verticalmente tal y como se ve en la figura 78 gracias al alto grado de movilidad de la espiral de cobre, consiguiéndose salidas pico a pico de 2 a 4,4 V y una salida máxima RMS entre 200 y 830  $\mu\text{W}$ , con frecuencias entre 60 y 110 Hz para amplitudes de vibración de menos de 200  $\mu\text{m}$  [15]. Todo el sistema ocupa un volumen máximo de 1  $\text{cm}^3$ .

El sistema se compone de un rectificador de onda completa, con diodos Schottky de  $V_{\text{ak}} = 0,32 \text{ V}$  en directa para rectificar la señal. Para el transmisor IR se utilizó el encoder comercial SM5021, que trabaja adecuadamente con 1,8 V. La salida baja hasta los 0,448 V cuando se añade el rectificador. Sin embargo, la tensión de salida en el convertidor elevador es de 2,3 V (figura 80(b)), suficiente para alimentar la mayor parte de los circuitos de baja tensión.

La corriente media es de 40  $\mu\text{A}$  y la potencia de aproximadamente 100  $\mu\text{W}$  para la aplicación como sensor wireless [15]. Esta corriente (40  $\mu\text{A}$ ) no es suficiente para alimentar directamente el encoder, por lo que se utiliza un condensador previo (C1) de 1,16 mF para almacenar la energía y utilizarla cuando interese transmitir información. En el momento de la transmisión, la corriente es de 1,5 mA para 2 V de tensión del condensador C1 (tarda unos 58 segundos en cargarse de 0 a 2 V, suficiente para dos transmisiones, en cuyo caso la tensión cae a 1,56 V, tardando unos 30 segundos en llegar de nuevo a 2 V). Cuando no se envía información, el microcontrolador se mantiene en espera con un consumo de 2,4  $\mu\text{A}$ .

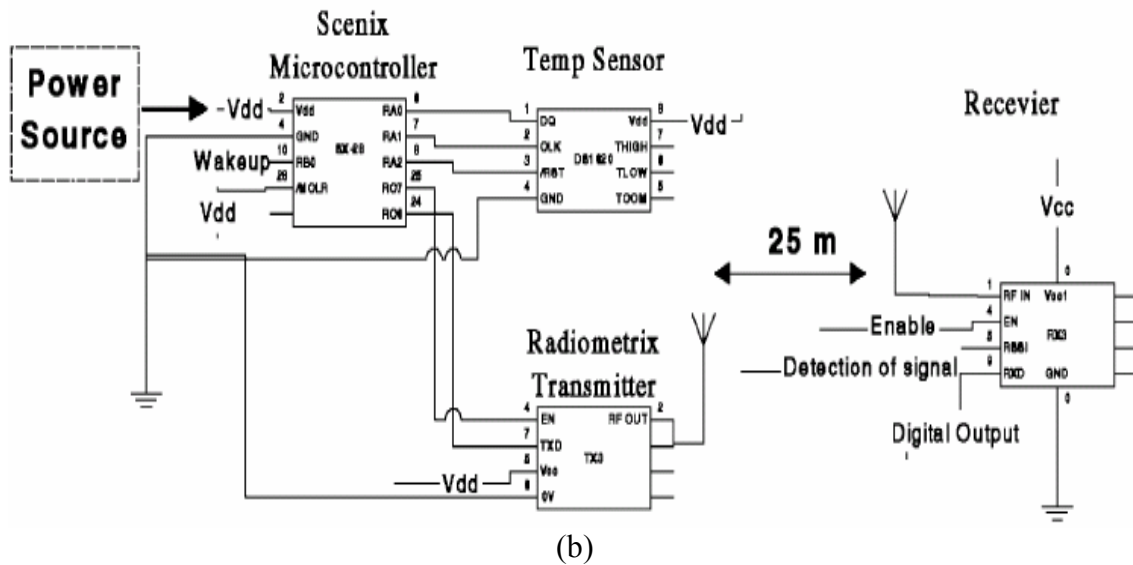
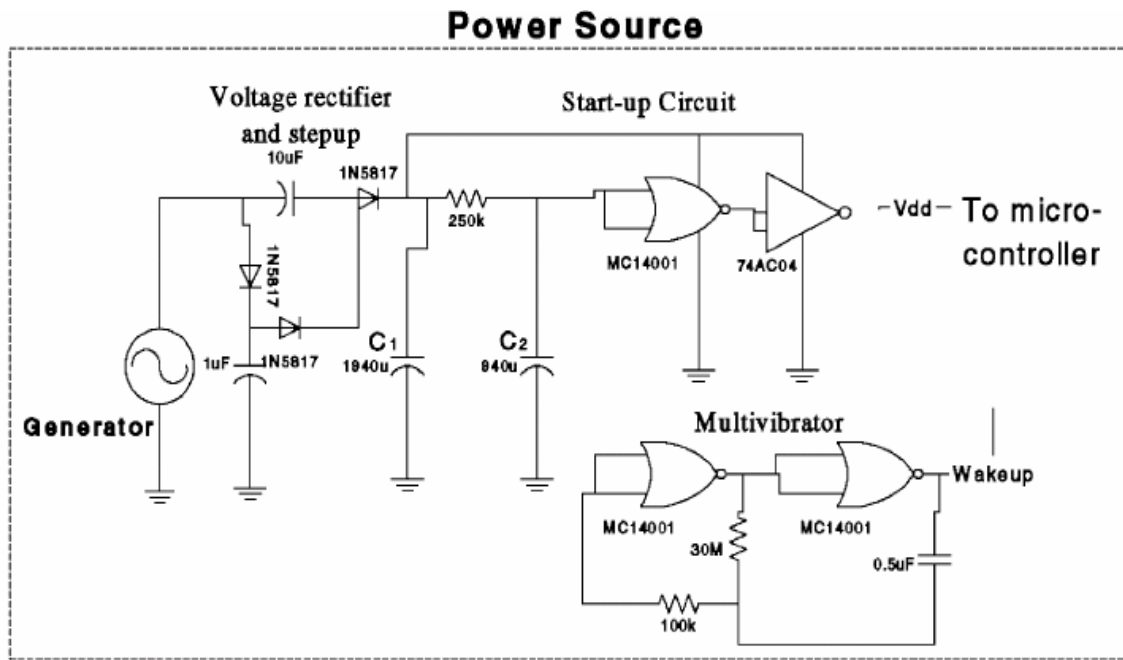


Fig. 79. (a) Esquema del sistema generador; (b) Esquema eléctrico del sistema para la medición de temperatura.

C1 sirve de reserva de la energía para cuando haga falta. Al mismo tiempo que se carga C1, se carga otro condensador (C2) a un ritmo más lento debido a la resistencia de 250 kΩ. Los valores de la resistencia y de los condensadores están elegidos para que la puerta lógica NOR MC14001 se encienda cuando la tensión en C1 es de 3,5 V, permitiendo tener así la suficiente energía para realizar la operación.

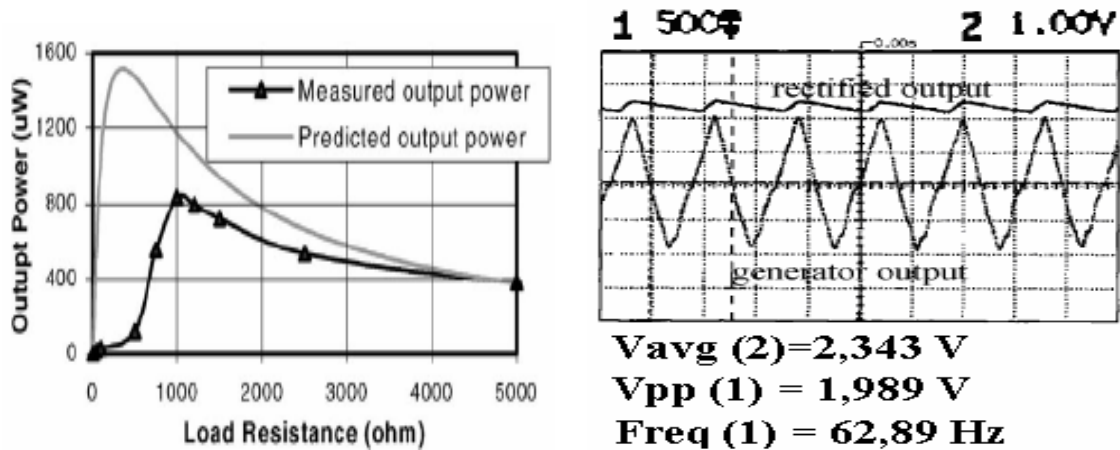


Fig. 80. (a) Potencia de salida RMS - resistencia de salida; (b) Gráfico con la tensión de salida sin carga y la tensión rectificada.

En el circuito hay principalmente tres componentes en lo que a consumo se refiere: el microcontrolador (SX-28), el sensor de temperatura (DS1620) y el transmisor de datos UHF-FM (TX3). El microcontrolador realiza el control de las operaciones, ordenando al sensor que en un determinado momento haga una lectura de la temperatura ambiente y la convierta a formato digital. El microcontrolador lee el dato mediante un protocolo de transmisión de tres cables. Tras esto envía el dato vía serie (RS-232) al transmisor, que modula la lectura digital en una señal FM de 914,5 MHz, para ser recibida en el módulo receptor a una distancia máxima de 25 metros. En este momento pasa el microcontrolador a modo de espera mientras se cargan los condensadores. Después de 30 segundos se le despierta enviando una señal a su patilla WAKEUP para que comience de nuevo el ciclo de lectura, conversión y transmisión de datos. Esta señal se consigue con un multivibrador en modo astable, que tiene dos estados no estables. Como se ve en la figura 79(a), no necesita señal externa para producir el cambio de estado, dependiendo el tiempo de cada estado únicamente de los valores de los componentes. Estos sistemas generan ondas cuadradas, que es lo que interesa para despertar al micro (transición entre 0 y Vdd).

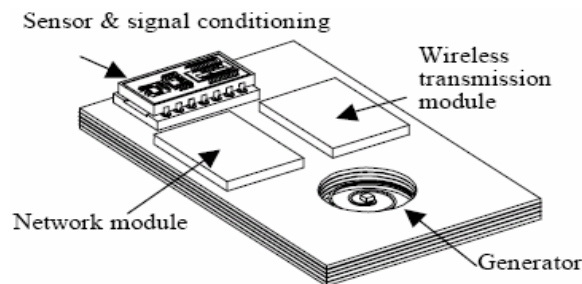


Fig. 81. Imagen completa del sistema.

**Segundo proyecto:** otro ejemplo de este tipo es el de la Universidad de Southampton, basado también en el aprovechamiento de las vibraciones del medio, con el fin de mover un imán permanente de forma lineal dentro de un bobinado. Se construyeron dos prototipos: el prototipo A contenía dos imanes y el prototipo B cuatro. Este último se probó montado en el motor de un coche. Los imanes son de una aleación de neodimio, hierro y boro, cuyo potencial magnético por centímetro cúbico es el más alto conocido hasta el momento, y pueden operar a más de 120°C. Si se necesita operar a más temperatura se pueden usar los de samario-cobalto, de menos potencial pero con temperaturas de utilización hasta 250°C [16].

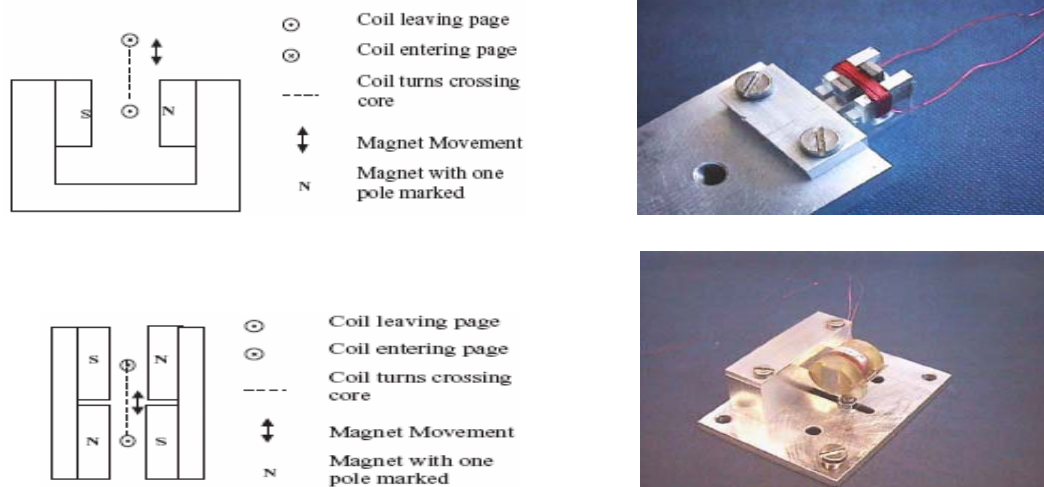


Fig. 82. Prototipos A (arriba) y B (abajo) para el aprovechamiento de vibraciones.

Para el experimento se utilizó un generador de señales regulado por un potenciómetro. Tras ser amplificada la salida se aplicó sobre un agitador que movía los prototipos. A partir de un acelerómetro colocado en el agitador, cuya señal llegaba a un analizador de espectros, se medían las amplitudes de la base. Con el prototipo A se obtuvo una frecuencia de resonancia del sistema a 322 Hz  $\pm$  1 Hz.

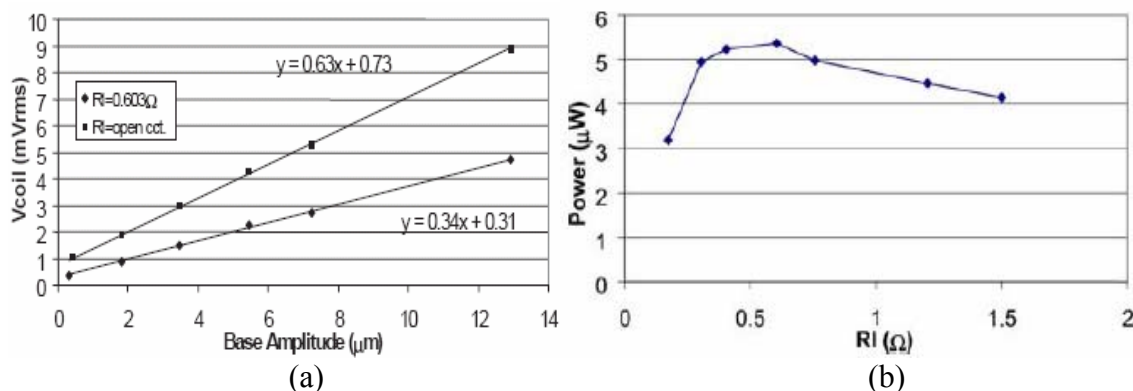


Fig. 83. (a) Gráfico de tensión en bobina-amplitud de vibración; (b) Gráfico de potencia de salida-resistencia de carga para el prototipo A.



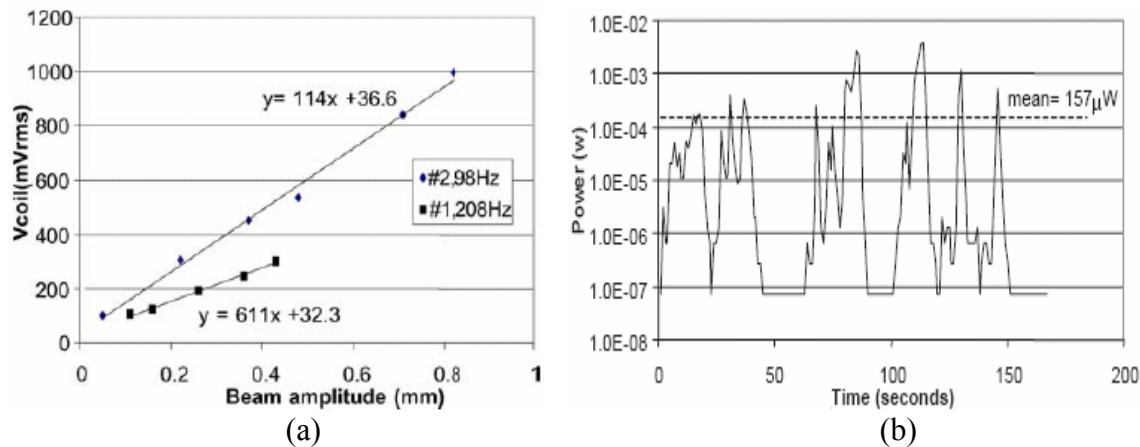


Fig. 84. (a) Gráfico de tensión en bobina-amplitud de vibración; (b) Gráfico de potencia de salida del prototipo B montado en un coche-tiempo.

En el prototipo A se obtienen potencias dignas de ser aprovechables pero no tensiones para aplicaciones útiles. Se obtuvo un máximo de  $37 \mu\text{W}$  para una resistencia óptima de  $0,6 \Omega$ . En el prototipo B, sin embargo, si se consiguen ambas cosas. Este último montado sobre el motor de un coche durante  $1,24 \text{ km}$  a una media de  $25 \text{ km/h}$  (incluyendo stops y tres semáforos) produjo una media de  $157 \mu\text{W}$  con picos de hasta  $3,9 \text{ mW}$  [16].

Una posible aplicación del anterior proyecto sería en sistemas de seguridad para detectar la apertura de puertas. El sistema completo estaría integrado en la misma puerta y aprovecharía las vibraciones de ésta al abrirse y cerrarse, alimentando un emisor de señales de alarma hacia un receptor que la activa. Todo ello se realizaría cuando un contacto mecánico, por acción de abrir la puerta, se pliegue y cierre el circuito que conecta la batería al sistema emisor.

Otra posibilidad es generar al mover el picaporte. Al mover las manijas se produce un flujo variable en el bobinado estático que las rodea internamente (la unión interna de las manijas contiene los imanes). También se puede poner en la pestaña móvil, que sale y entra por la acción de un muelle cada vez que se abre o cierra la puerta respectivamente. Además, se puede incluir una pequeña rueda que haga contacto con el suelo, moviendo así una dinamo. Sea cual sea la forma escogida, el sistema de seguridad estaría compuesto por un sistema de alimentación, un interruptor mecánico que cierre el circuito al abrirse la puerta (también se podría poner detectores de variación de flujo magnético en su lugar, aunque dependería del consumo) y un transmisor de señal de alarma.

Añadiendo más posibilidades de aplicación para el microgenerador de la Universidad de Southampton esta la de incluirlo en las vías del tren con el fin de alimentar determinadas luces de señalización o la de alimentar un sistema que detecte si un conductor se salta un semáforo. En este caso es el mismo conductor el que activa un transmisor RF al pisar su coche una plataforma con capacidad para vibrar. El transmisor solo envía una señal de aviso a un receptor, que se encarga a su vez de controlar una cámara que toma instantáneas con la matrícula del infractor. El receptor y el sistema de actuación serían alimentados con red eléctrica.

**Sistemas vendidos:** algunos generadores magnéticos comerciales basados en el efecto anterior son los desarrollados por la empresa americana FerroSolutions y la británica Perpetuum. En el primer caso se llegan a desarrollar 9,3 mW, con 100 mg de masa y vibraciones a 21 Hz [51]. En el segundo caso se puede llegar a los 5 mW con 100 mg, resonando a frecuencias entre 50 y 60 Hz [14]. Para este último se tiene una estructura que soporta un bobinado fijado en su extremo. Rodeándolo están dos imanes de NdFeB (neodimio-hierro-boro), integrados en un elemento a modo de pinza que los mantiene. Este elemento también porta exteriormente una masa de tungsteno, que facilita el movimiento lineal de los imanes en torno al bobinado cuando el conjunto se mueve (vaivén). Este conjunto pende con respecto a la estructura mediante una placa de cobre. El fabricante sugiere su aplicación en redes de sensores wireless. Para ello se pueden montar en motores, lavadoras u otros elementos.



(a)

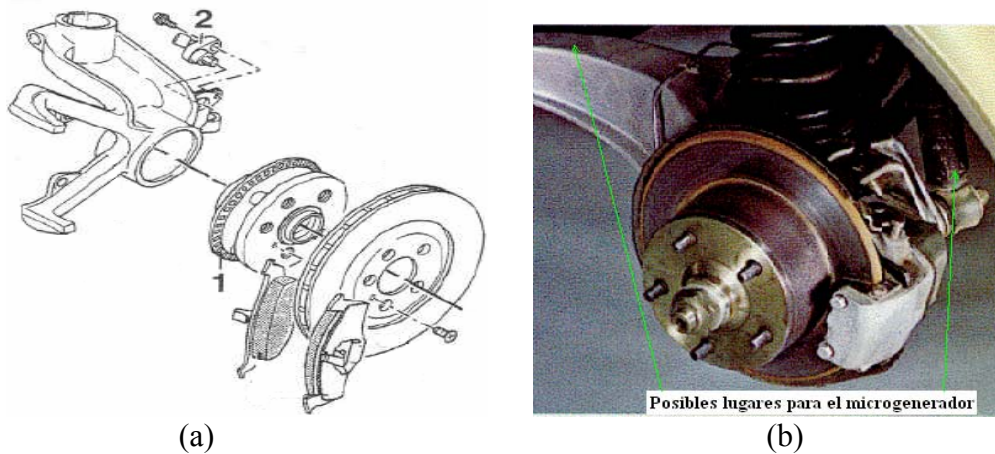


(b)

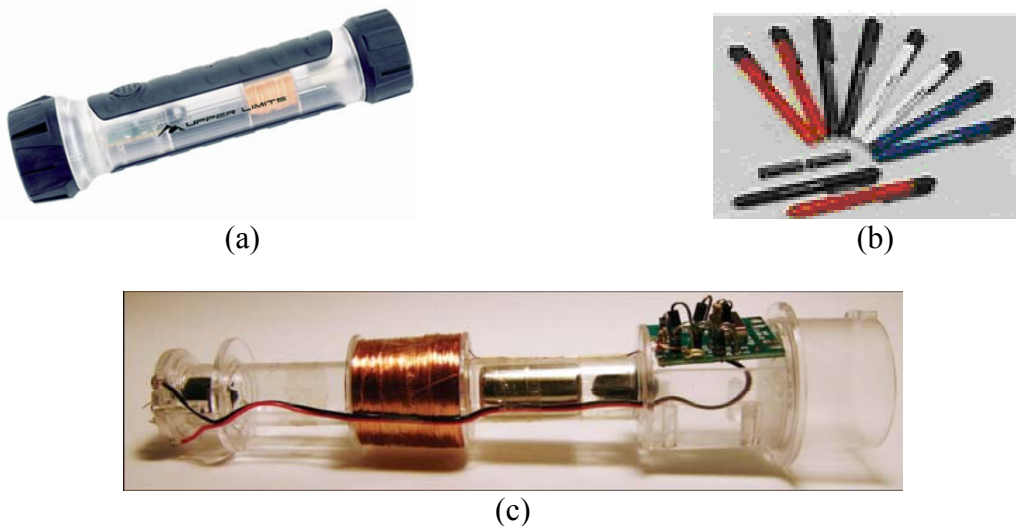
Fig. 85. (a) Generador de FerroSolutions; (b) Generador PMG7 de Perpetuum.

**Sistema de frenado:** un dispositivo similar a los anteriores podría aprovechar las vibraciones producidas en un automóvil al rodar (altas frecuencias). En este caso se puede disponer el conjunto generador básicamente en dos emplazamientos: en el amortiguador o en el bastidor (también es posible en el chasis), ya que en ambos se realiza un movimiento lineal de vaivén. Esta posibilidad es más conveniente que el uso de un sistema rotativo (dinamo) debido a su mayor simplicidad y no necesidad de contacto con el medio.

La energía recavada alimentaría sensores que midan el número de giros de cada rueda y lo envíen mediante radiofrecuencia a una centralita electrónica de reparto de frenada (o también un ABS) para actuar conforme al nivel de giro de cada rueda en cada instante. En el caso de la figura 86(a) se muestra el sistema de frenado de un coche, siendo 2 un sensor que mide el número de giros de la rueda y 1 la rueda dentada donde se miden. También es factible utilizar sensores para medir otras variables, como desgaste de pastillas, humedad del piso, fugas de líquido en el circuito, estado del amortiguador, etc.



**Agitación de un sistema:** algunos dispositivos actualmente comercializados y similares a los anteriores pueden ser linternas que se cargan al agitarlas, punteros láser, luces de señalización de la policía, etc. Estos aparatos llevan un imán permanente suspendido con un muelle, de manera que al agitar el producto el imán pasa entre la bobina generando una corriente inducida por la variación del campo magnético debido al movimiento del imán dentro de la bobina (también puede moverse la bobina dentro de un campo magnético generado por un imán estacionario). Al final del cilindro, el imán choca contra un parachoques de goma que evita problemas de sobre estiramiento del muelle. Así se reduce la pérdida de producción de corriente. Lleva además una pila recargable, un circuito amplificador, un interruptor y el diodo led que finalmente alumbrá. En el caso de la linterna, ésta pesa 150 gramos y produce 200 mW cuando se agita a su frecuencia de resonancia mecánica, aproximadamente 3,3 Hz [49].



En la figura 88 se puede ver un microgenerador fabricado por el Centro de Micro y Nanosistemas de Hong Kong, formado por un tubo cerrado que alberga otros tres más pequeños. Los cilindros amarillos contienen un imán que gira dentro de un bobinado. Estos elementos quedan encerrados dentro de dos tapones que les confieren estanqueidad.

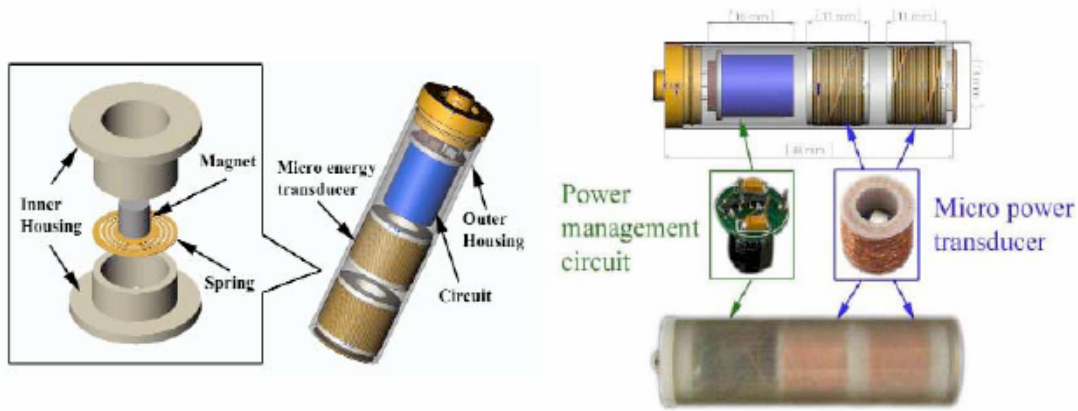


Fig. 88. Sistema microgenerador doble de imán permanente y bobina.

El cilindro azul alberga la electrónica del sistema. Este pequeño generador, que tiene el tamaño de una pila tipo AA, recava una potencia de  $680 \mu\text{W}$  a  $4,4 \text{ V}$  pico a pico en una carga de  $1500 \Omega$ , para unas frecuencias entre  $60$  y  $110 \text{ Hz}$  [12].

**Mando a distancia:** utilizando el mismo principio de agitar para generar podemos sustentar cualquier mando a distancia que utilice generalmente un par de pilas. De la misma forma que con la linterna, se puede generar suficiente energía para transmitir señales de infrarrojo hasta un televisor u otro aparato a pocos metros, como ya se vio en el primer proyecto de microgeneradores magnéticos.

**Generación al pulsar un botón:** la empresa alemana EnOcean ha fabricado y comercializado un transmisor de código (PTM 200) que funciona con un microgenerador electrodinámico. El sistema trabaja pulsando un botón, lo que genera electricidad suficiente para hacerlo funcionar, mandando un código de 32 bits ID a un receptor con el estatus de “botón pulsado” [43]. Al soltar el botón, el sistema envía un código diferente, teniendo en cuenta el tiempo entre que está pulsado y deja de estar pulsado. Además se envía el estado de cuatro pulsadores adicionales.

El sistema consta de: un generador de energía electrodinámico, un convertidor de potencia (rectificador), un procesador y un transmisor de alta frecuencia ( $868,3 \text{ MHz}$  con un consumo máximo de  $10 \text{ mW}$ ). Al pulsar el botón principal de alimentación, lo que se hace es mover un imán permanente en el seno de un bobinado, lo que produce una variación del flujo magnético, generando la suficiente energía para alimentar todo el conjunto. Un rectificador transforma la corriente que necesitan el procesador y el módulo transmisor.

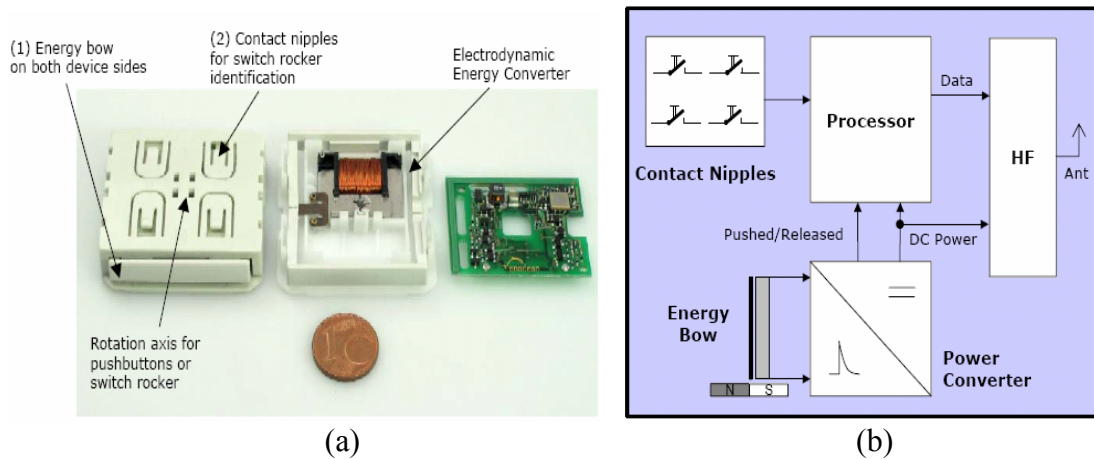


Fig. 89. (a) Sistema de control y transmisión autoalimentado PTM 200; (b) Diagrama de bloques del conjunto.

El sistema se utiliza generalmente para el control de encendido y apagado de luces y celosías, pudiendo tener otras muchas funciones, como tímbrs para llamar o de alerta, sistemas de apertura remota de puertas, sistemas de seguridad para fábricas (desconexión automática de un proceso de fabricación en caso de accidente), etc.

**Juguetes:** en la figura 90 se puede ver el juguete de la serie de dibujos animados japonesa “Kodomo No Omocha”, en el que se carga una pequeña batería al pulsar un botón externo al circuito (botón cargador), con el fin de hacer sonar melodías en un altavoz cuando se pulsa otro botón.

Otra posibilidad dentro de este campo es la de instalar una dinamo en un coche de juguete, de forma que al hacerlo rodar obtenga energía para hacer lucir diodos led a modo de luces de alumbrado.



Fig. 90. Juguete con melodías

**Control de los elevallunas en un coche:** la figura 91 representa un sistema de generación y control wireless para comandar la bajada y subida de ventanillas en un automóvil. Como puede verse, se tienen dos elementos generadores iguales, donde se mueven imanes linealmente dentro de un bobinado tanto si se sube como si se bajan las ventanillas. Se evita tener un elemento de almacenamiento, ya que toda la energía generada se utiliza para enviar la orden al receptor de la puerta que comanda el motor de



## Sistemas electromagnéticos.

---

los elevallunas. Este dispositivo sería innecesario en caso de tener los botones de control de ventanillas en las puertas del vehículo. No es así si tenemos los botones en el panel central del habitáculo, lo que obligaría a llevar cables eléctricos hasta éstos (estos botones hacen de interruptores para cerrar el circuito de alimentación de los motores). En el caso que nos ocupa hay que tener un control sobre el tiempo de pulsación para abrir más o menos la ventanilla.

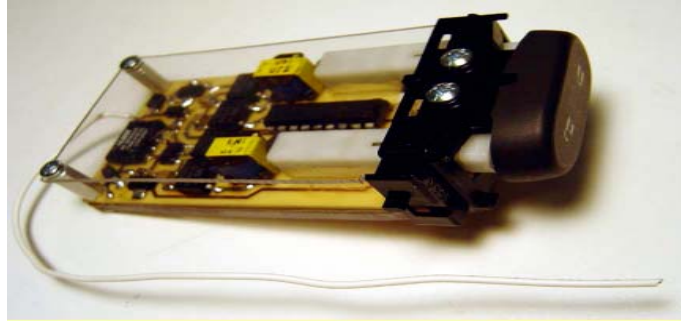


Fig. 91. Sistema de bajada y subida de ventanillas.

**Timbre de llamada en una puerta:** el invento trabaja de forma que al apretar el botón del timbre se haga, como en los casos anteriores, mover un imán en las cercanías de un inducido. Ciertamente, aplicar un microgenerador en una puerta de entrada a una casa es generalmente innecesario por la posibilidad de alimentar el sistema con red. Pero no ocurre lo mismo en las puertas perimetrales a una finca o chalé, donde se debería llevar un cable desde la casa hasta el timbre de la entrada. El sistema propuesto generaría la suficiente energía eléctrica para sustentar un transmisor, cuya señal indicará al receptor de la casa la pulsación del botón exterior. Una vez recibida la señal, el receptor procedería a activar el timbre de aviso. Este receptor puede estar alimentado con red u otro método.

Para evitar el envío de varias señales por la pulsación continuada del botón, un microcontrolador (u otro elemento) se encargaría de inhabilitar por un tiempo prudencial la emisión de señales (unos 10 segundos posteriores a la primera pulsación). De esta forma no solo no se consume energía sino que se aprovechan estas pulsaciones innecesarias para cargar la batería. Durante este tiempo se haría sonar el timbre interior de la casa. En este ejemplo es posible utilizar el generador de botón conjuntamente con un pequeño panel solar para aumentar la cantidad de energía, ya que la aplicación es al aire libre.

## Generación a partir de movimiento rotativo.

**Patines generadores:** una posible integración de una dinamo para microgeneración (figura 77) puede ser la de ir montada en unos patines. Al patinar se conseguiría la suficiente energía para alimentar un sistema de potencia y de transmisión vía radio. Podríamos alimentar sensores para medir nuestro ritmo cardíaco y otras variables con el fin de transmitir las a un receptor estático, que de otra forma deberíamos

portar. O también podríamos sustentar un reproductor MP3 incluido en el sistema para escuchar música. Cada patín contendría su electrónica, una pequeña batería (actualmente un pequeño lector MP3 utiliza una pila tipo AAA) y su dinamo respectivamente, utilizándose las ruedas delanteras o de ataque como fuerza motriz de la dinamo, ya que están mayor tiempo en contacto con el suelo.

**Aprovechamiento del esfuerzo humano:** de la misma forma que en el ejemplo anterior, podemos integrar una dinamo en una bicicleta estática o en bancos de musculatura, con el fin de medir los kilómetros recorridos, calorías consumidas, la hora, kilos levantados, número de veces que realizamos el ejercicio y demás información. El movimiento giratorio de ciertos ejercicios de musculatura en brazos y piernas, y por supuesto el giro de pedales proporciona energía suficiente para sustentar toda la electrónica que integran estos aparatos.

**Electricidad a partir del viento:** podemos aprovechar el movimiento del aire como se hace en los campos eólicos. En éstos es crítica la elección del diámetro de la hélice para una velocidad del viento de generalmente entre 5 y 10 m/s, soplando éste en varias direcciones, lo que supone una pérdida de rendimiento. Esto no es viable para microgeneración, pero si puede serlo utilizar una pequeña hélice (no más de 10 cm) dentro de un sistema móvil (coche, moto), aprovechando el caudal de aire al moverse hacia delante. Dentro de una carcasa estarían separados dos compartimentos, uno para la entrada-salida de aire, la hélice y la dinamo y otro para la electrónica y batería. Es probable que con un flujo suficiente de aire a 25 m/s se puedan obtener unos pocos vatios de potencia en una dinamo similar a la de la figura 77. Un automóvil o una motocicleta son sistemas que contienen elementos de generación propios, siendo difícil encontrar una aplicación específica para el dispositivo. Desde luego podría cargar un teléfono móvil con la dinamo adecuada, pero esto no es demasiado problema para el propio alternador del coche. Podría, sin embargo servir de elemento de generación y acumulación de energía para sistemas ininterrumpidos, es decir, sistemas que deban funcionar siempre aunque el alternador o la batería tengan problemas (desgaste de escobillas, nivel bajo del electrolito, etc). Actualmente hay vehículos, como el deportivo Mercedes SL, que disponen de un sistema de frenos electrónico. La unión entre el pedal y el pistón inyector del líquido de frenos no es mecánica, sino que se mide con sensores la cualidad de la pisada y a la vez factores externos (agarre de cada rueda, velocidad, etc) para actuar sobre la bomba que impulsa el líquido y sobre el tiempo de apertura y cierre de las electroválvulas para repartir la frenada. Otro caso son los futuros conjuntos de dirección asistida eléctricos, sistemas ABS, etc. En todos estos dispositivos se está introduciendo electrónica para controlar mejor el comportamiento y hacerlos más efectivos y rápidos, con lo que el consumo de potencia eléctrica global aumenta considerablemente. El conjunto propuesto podría servir a modo de sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) para estos sistemas que necesitan funcionar pase lo que pase.

**Relojes de pulsera:** en muchos relojes de pulsera o de sobremesa se introducen electroimanes formados por una bobina alimentada por una pila. La pila magnetiza la bobina creando un electroimán, el cual mueve un volante que a su vez mueve la maquinaria. Actualmente los esfuerzos se concentran en cambiar las pilas por pequeños

generadores eléctricos, aprovechando energías como el movimiento de agitación de la mano, el calor corporal, la energía del Sol, etc, que suministren corriente a un reloj durante toda su vida útil. Son bien conocidos los mecanismos de cuerda utilizados desde hace décadas, cuyo muelle se pone en tensión automáticamente por la acción de una palanca, impulsada por los movimientos del brazo de la persona que lo lleva. Ahora la mayoría de los relojes son eléctricos gracias al avance de la microelectrónica en la miniaturización de componentes y consumo de éstos. Así se ha conseguido reducir la maquinaria de precisión y aumentar las prestaciones de éstos. Por ello se está trabajando intensamente en fuentes de alimentación autónomas capaces de alimentar con pocos microvatios una sencilla maquinaria. Algunos de los inventos actuales son por ejemplo los sistemas de las marcas ETA Autoquartz y Seiko.

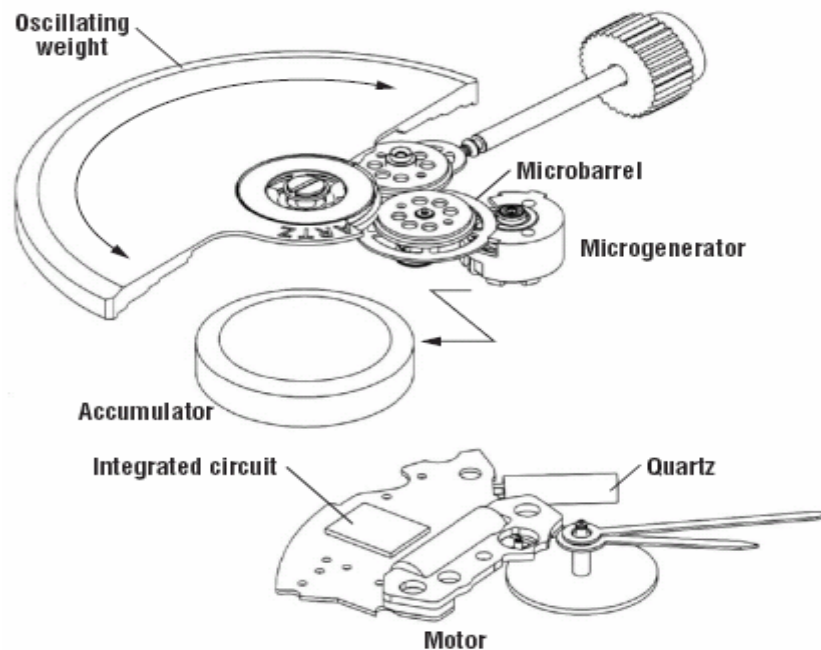


Fig. 92. Mecanismo del reloj ETA Autoquartz.

**Reloj ETA Autoquartz (grupo Swatch):** en este sistema, una masa rotatoria de aproximadamente 2 gramos gira libremente con el movimiento del brazo. Como es lógico, la masa tiene mayor grosor en la región exterior para así ganar inercia más fácilmente. Esta masa, al girar sobre su eje, mueve un pequeño engranaje que tiene acoplado. Éste a su vez mueve otro engranaje más pequeño para ganar velocidad en el giro. Es este segundo engranaje el que transmite el movimiento de la masa semicircular a un pequeño generador de corriente continua, que a su vez alimenta una pila de botón recargable. El generador es capaz de proporcionar 6 mA a más de 16V para un nivel de giro de 15000 revoluciones por minuto [9], aunque no se necesita esta cantidad de revoluciones para mover el mecanismo.



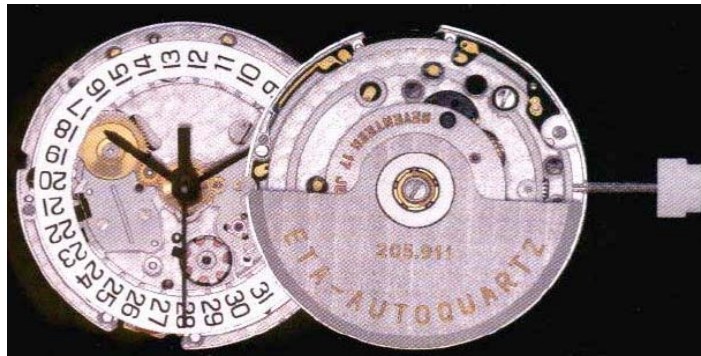


Fig. 93. Reloj ETA Autoquartz.

El sistema de alimentación secundario es el mismo que el de cualquier reloj eléctrico de manecillas, es decir, un circuito integrado con su oscilador de cuarzo, que marca la frecuencia de los pulsos. Cuando es necesario envía un pulso a una bobina, que transforma dicho pulso eléctrico en un movimiento de las manecillas.

**Reloj Seiko AGS:** el sistema de Seiko es muy parecido al anterior. La masa transmite su giro a través de una rueda dentada intermedia a un eje con un pequeño imán. Este eje gira entre dos pequeñas placas metálicas unidas a la bobina, generándose una corriente. Este sistema es capaz de generar  $5 \mu\text{W}$  de media en utilización normal y hasta  $1 \text{ mW}$  cuando el reloj es fuertemente sacudido [9].

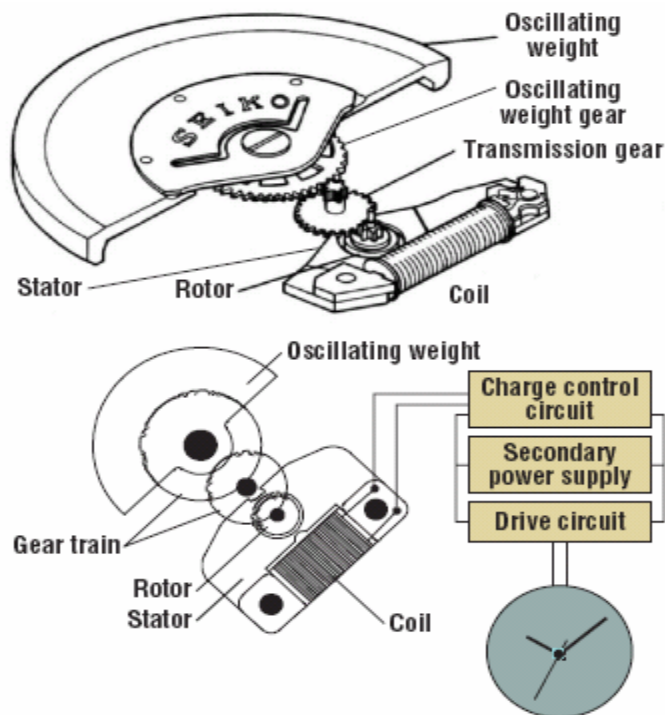


Fig. 94. Sistema generador Seiko AGS (Automatic Generating System).

## Sistemas electromagnéticos.

---

Seiko ha utilizado este sistema para probarlo en animales marinos a fin de comprobar su capacidad de generación. Este sistema AGS tiene una escala mayor que los relojes para los que esta pensado, consiguiéndose entre 5 y 10 mW de potencia [12]. Estos ingenios podrían alimentar chips que recojan datos sobre el comportamiento animal en su medio natural, gracias a la alta movilidad de estos.



Fig. 95. Sistema AGS utilizado en animales marinos.

Como puede comprobarse, los sistemas de ambas marcas son muy parecidos y dan una idea de las posibilidades dentro de la autogeneración de energía eléctrica para pequeños sistemas.

**Luz en una bicicleta:** las dinamos son uno de los generadores más utilizados desde su invención. Un ejemplo de dinamos son los generadores de corriente de las bicicletas, las cuales aprovechan el movimiento de su eje en contacto con la rueda para producir corrientes inducidas y alimentar así la luz delantera que alumbra y nos hace visibles para otros.

**Cargador de móvil:** otro ejemplo con dinamo incorporada son los cargadores de teléfonos móviles con linterna incluida, que llevan una dinamo incorporada. Al hacer girar una manivela se produce directamente corriente que es almacenada en acumuladores (pilas recargables). En el caso de utilizar su función como linterna, se alimentan varios diodos led con la energía acumulada al mover durante unos segundos la manivela, lo cual nos proporciona horas de luz ininterrumpida. Sin embargo, al utilizarlo como cargador de móvil, necesitamos una mayor corriente de alimentación (del orden de centenares de miliamperios), lo que obliga a utilizar durante más tiempo la manivela. En este sentido es un cargador portátil de emergencia, el cual incluye adaptadores para las distintas marcas de teléfono. Es capaz de ofrecer hasta 2 W a 400 mA [50].



Fig. 96. Linterna autoalimentada con función de cargador y sus adaptadores.

Además de los inventos anteriores, que tratan básicamente de aprovechar la energía de giros intencionados, y movimientos, se han desarrollado sistemas con generadores mecánicos de rotación aplicados al cuerpo humano y cuyo objetivo es aprovechar la fuerza ejercida por la masa del cuerpo al realizar funciones tan normales como es el andar. Estos sistemas son, a decir verdad, complejos de diseñar y de integrar en cualquier lugar, sobre todo cuanto mayor es la energía que queremos obtener. Uno de estos ejemplos es el siguiente:

**Sistemas de generación en un zapato:** uno de los laboratorios del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) diseñó y construyó a finales de los años 90 un par de sistemas con generadores de rotación aplicados a un zapato. Éstos, aunque eran capaces de generar suficiente energía para alimentar, por ejemplo, una radio de cierta capacidad, eran sistemas por lo general complicados, frágiles, demasiado pesados y difíciles de integrar.

**Primer proyecto:** este sistema consta de una palanca externa al zapato, que baja cuando se pisa el suelo, y vuelve a su posición original por la acción de un tensor. Al bajar y subir la palanca se logra el giro de un tren de engranajes con el fin de ganar velocidad en el último de ellos, cuyo eje tiene una polea que mueve un par de dinamos. Todo este complejo y pesado sistema va ubicado en la suela del zapato. Este sistema era capaz de generar una media de 60 mW, con picos de hasta 1,61 W [9], [56].

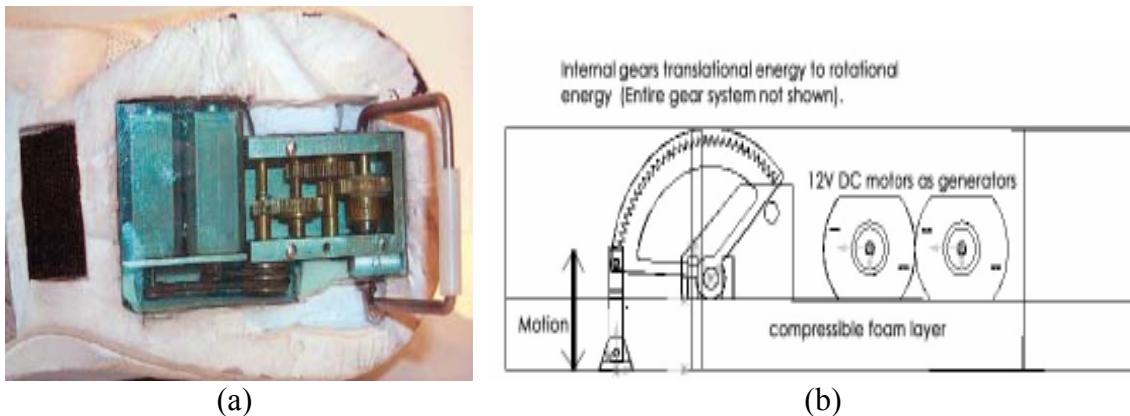


Fig. 97. (a) Sistema integrado en el zapato; (b) Transformación de una pisada en un giro de las dinamos.

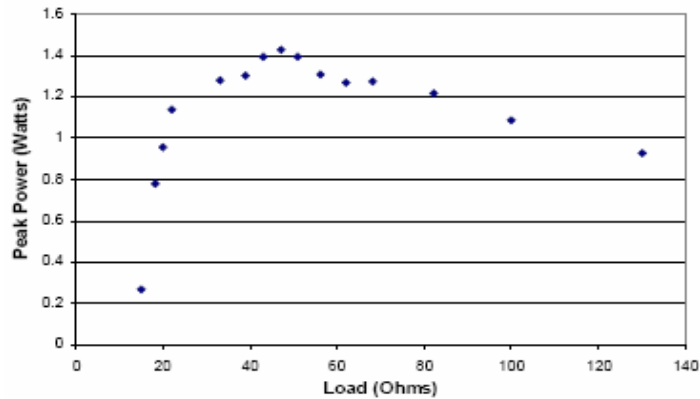
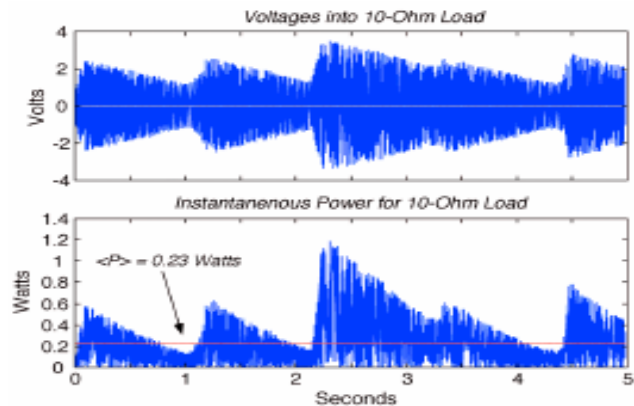


Fig. 98. Gráfico de potencia en función de la carga utilizada a la salida.

**Segundo proyecto:** otro de los sistemas desarrollados se basa en el mismo efecto del anterior, aunque los elementos son externos al zapato (figura 99 (a)). Fue capaz de producir una media de 250 mW, capaz de alimentar una pequeña radio [9]. Quizá sea posible añadirle un circuito hidráulico que permitiera mover directamente los generadores, aunque aun así seguiría siendo complicado implementar estos sistemas en tan reducido espacio. Las cifras obtenidas dependen en gran medida del peso del usuario y de la repetitividad del ejercicio. Es seguro que para esta aplicación sea mejor usar microgeneradores piezoeléctricos o electrostáticos, más pequeños y ligeros, lo que da lugar a que puedan albergar una pequeña batería que almacene la energía no consumida.



(a)



(b)

Fig. 99. (a) Sistema externo al zapato; (b) Gráficos de tensión y potencia en el tiempo para una carga de 10  $\Omega$ .

**Generación mediante una masa colgante:** este sistema de la Universidad de Pennsylvania aprovecha la acción de andar con una mochila a la espalda. Este sistema esta formado por una estructura tubular, con una plataforma plana unida a ella mediante

muelles. De esta manera se consigue que la plataforma se mueva paralelamente a la estructura, moviendo a su vez una dinamo mediante una correa dentada. Un movimiento vertical continuado de unos 5 cm, con una masa de unos 20 Kg puede generar más de 7 W [12].

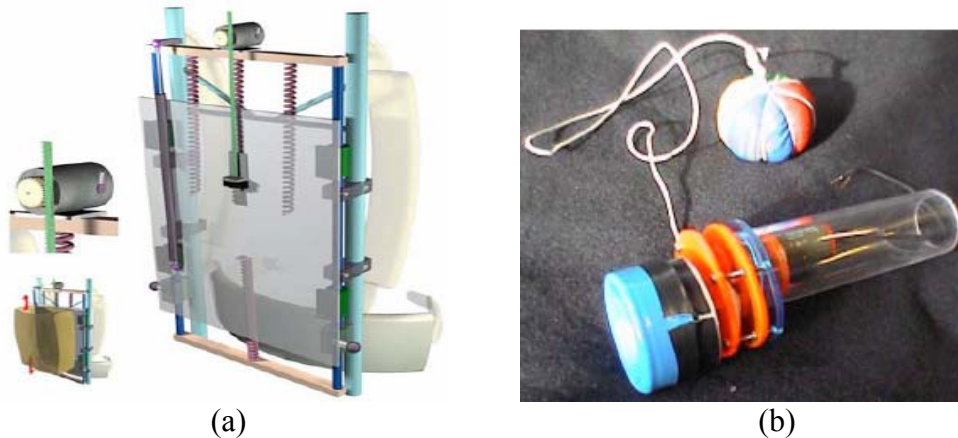


Fig. 100. (a) Sistema de generación con el peso de una mochila; (b) Bolo eléctrico del MIT.

De la misma forma se puede disponer el bolso de un carrito de la compra o de reparto sobre su estructura para conseguir un movimiento de vaivén que produzca el giro de una dinamo. También es posible aprovechar directamente el giro de sus ruedas a través de una correa o cadena al ser tirado. Del mismo modo se puede aplicar al carrito de un niño o una mecedora para cargar baterías u otros fines.

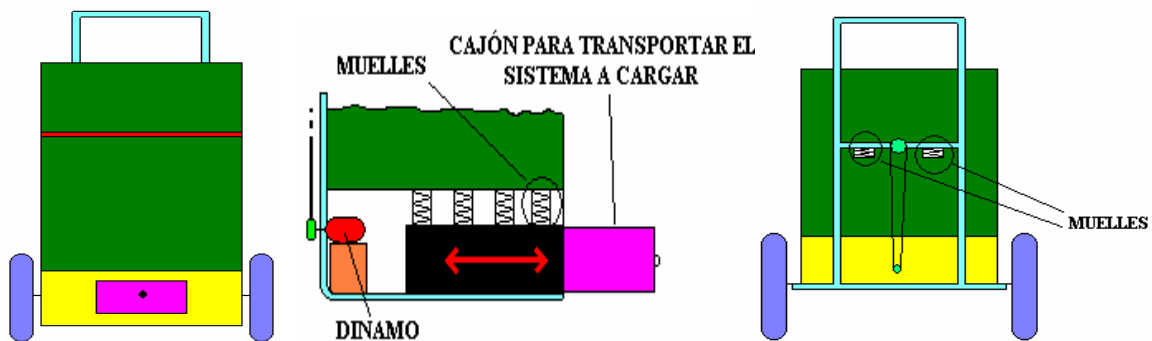


Fig. 101. Carro de la compra con sistema generador.

El giro de una dinamo también se puede aplicar en juguetes, de forma que un niño haga girar una cuerda con una masa en uno de sus extremos y un eje con la dinamo en el

otro (figura 100 (b)). En un prototipo desarrollado en el MIT se consiguieron del orden de 3 a 5 W con una masa de 100 y 200 g, un radio de cuerda de 3 a 5 metros y una frecuencia de 1 a 2 Hz [12]. Con este potencial se pueden encender leds de colores y hacer que suenen diferentes melodías para entretener a un niño pequeño.

Esta forma de aprovechar energía también es factible al subir y bajar persianas, aprovechando el movimiento y el peso de éstas para alimentar detectores de apertura de las ventanas, medidores de temperatura o de intensidad de luz.

**Ordenador portátil:** esta idea de la fundación OLPC para que los niños de los países pobres tengan un ordenador propone el uso de electrónica de muy bajo consumo, nuevos displays y software especiales para conseguir un consumo global de aproximadamente 1 W [12].



Fig. 102: (a) Ordenador portátil autoalimentado; (b) Sistema en pedal de bicicleta.

**Pedal de bicicleta:** como puede verse en la figura 102(b), la empresa Kinetron ha diseñado microgeneradores rotativos para ir instalados en los pedales de las bicicletas, aprovechando su giro. Este sistema consta de una pequeña dinamo con un total de 24 polos, capaz de generar hasta 10mW para alimentar un diodo LED. El sistema empieza a funcionar a partir de 30 r.p.m, con un tiempo de vida del conjunto de 5 a 10 años [65]. También es una opción la de instalar el sistema en las balizas de mano de la policía para encauzar el tráfico. Aquí la energía motriz es lógicamente el movimiento ejercido por la persona para hacer girar la dinamo y hacer lucir un LED de alta luminiscencia que lleva.



### **2.4.4.4 Conclusiones.**

Los microgeneradores electromagnéticos tienen aproximadamente una densidad de energía menor a  $1 \mu\text{W por cm}^3$  [10], lo que implica en principio una gran dificultad para ser miniaturizados. Sin embargo son capaces de generar para el caso de pequeñas dinamos unas potencias máximas de salida de unos pocos vatios, según la disposición en que se aproveche y su frecuencia de funcionamiento, pero lo pagan en tamaño y peso, generalmente por el volumen del imán permanente y la difícil integración del bobinado. A pesar de ello se han aplicado comercialmente en sistemas de todo tipo. Éstos aprovechan, por ejemplo, el movimiento del cuerpo al moverse (relojes inerciales), sacudidas voluntarias (punteros para la pizarra o linternas), vibraciones de un coche y otras formas de energía.

Por otro lado se han desarrollado bobinados miniaturizados e impresos en una placa utilizando técnicas de fabricación de microchips. Estas bobinas se diseñan con varias formas (cuadradas, redondas, ovaladas, etc), que consiguen reducir drásticamente el tamaño del conjunto, aunque presentan inconvenientes como tener grandes resistencias internas y capacitancias parásitas, lo que reduce su eficiencia en la conversión. Aún así obtienen eficiencias en torno al 35-40% [64], más altas que los sistemas piezoeléctricos, por ejemplo. Con respecto a estos últimos no tienen sus inconvenientes intrínsecos ni dependen tanto de la disposición del elemento para conseguir grandes deformaciones. Como sistemas dependientes de la frecuencia comparten la necesidad de materiales adecuados que aprovechen las vibraciones y movimientos del medio. Éstos han de tener una cierta flexibilidad sin llegar a la deformación permanente. En el caso de los magnéticos que aprovechen vibraciones externas a partir de la flexión del material donde van colocados los imanes, es imperativo que la distancia de los imanes entre si sea la menor posible, además de utilizar imanes con un campo magnético alto y geometría de reducidas dimensiones para un buen aprovechamiento de las vibraciones de baja intensidad.

Este tipo de sistemas no son probablemente los más adecuados para construir sistemas a escala MEMS, ya que al hacerlo se ven limitados en factores como el número de vueltas de la bobina, reducción del imán, etc que reducen la energía final conseguida. Por el contrario se han conseguido pequeñas dinamos y otros microgeneradores electromagnéticos con buenos resultados de energía. Por ello son bastante interesantes en aplicaciones donde se puedan aprovechar principalmente rotaciones y pulsaciones, aunque también vibraciones de otro tipo.

## **2.4.5 SISTEMAS ELECTROSTÁTICOS.**

### **2.4.5.1 Introducción.**

La electrostática es la parte de la física que estudia las acciones producidas entre cargas eléctricas en reposo. Es conocido el hecho de que una barra de ebonita frotada con un paño de lana adquiere la propiedad de atraer ciertos cuerpos, como el papel y el azúcar [28]. Esta fuerza de atracción es tan pequeña, que para manifestarse se necesita que los cuerpos sobre los que actúa sean muy ligeros y estén muy próximos a la barra.

Hacia finales del siglo XVII el científico inglés Robert Boyle (1627-1691) explicó la causa de este fenómeno con el nombre de electricidad, del vocablo griego electrón, y llamó electrizados a los cuerpos que la sufrían. Posteriormente, el ingeniero y físico francés Charles- Augustin de Coulomb (1736-1806) determinó la ley por la que se regían las manifestaciones eléctricas y estableció que en los cuerpos puntiformes electrizados, las acciones eléctricas son directamente proporcionales al producto de sus cargas e inversamente proporcionales al cuadrado de su distancia ( $r$ ), y dependen del medio (aire, agua, vacío, etc.) en que ambos estén. La expresión matemática de esta ley es la siguiente:

$$F = K( Q_1 \times Q_2) / r^2 \quad (28)$$

siendo  $K = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$  en el vacío.

Las conclusiones son que los cuerpos pueden ser electrizados por contacto, y que existen dos tipos de electrización diferente: positiva y negativa, que depende de las sustancias con que se haya puesto en contacto el material.

### **2.4.5.2 Principio de funcionamiento.**

Del experimento anterior se sabe que para que un cuerpo quede cargado eléctricamente hace falta algo que sea capaz de romper su estado neutro. En el caso de la ebonita se consigue frotándola para romper los débiles enlaces de sus electrones. En el caso de los generadores electrostáticos se hace cargándolos previamente aplicando una tensión inicial.

Los microgeneradores electrostáticos son básicamente condensadores variables miniaturizados. Actualmente consisten en una estructura con láminas o “dedos” móviles. Al tener estos dedos la posibilidad de desplazarse a partir de vibraciones externas, se consigue variar la capacidad del condensador, bien sea variando el área de las láminas que queda enfrentada o la distancia entre ellas. Debido a que la fuerza entre estas láminas aumenta con el cuadrado de la tensión inicial aplicada en ellas, el potencial correspondiente para generar electricidad se incrementa. Estos sistemas son resonantes a unas determinadas frecuencias y se pueden presentar básicamente en tres topologías diferentes:



- Variación de área en el mismo plano: las pletinas móviles se mueven de forma paralela en el mismo plano con respecto a las fijas, variando el área útil (figura 103 (a)). Al aumentar el área enfrentada de las pletinas debido al movimiento aumenta la capacidad. Esta configuración suele tener la capacidad máxima más baja de las tres configuraciones, debido a la limitación en el tamaño de las láminas, además de tener problemas de choques y deformaciones entre las pletinas a partir de movimientos en direcciones no deseadas. Se puede apaciguar este problema sin llegar a eliminarlo reduciendo la separación entre placas.
- Variación de hueco en el mismo plano: las pletinas se mueven en la dirección de la flecha de la figura 103 (b), variándose el hueco existente entre ellas y con ello la capacidad. Este sistema posee una mayor capacidad máxima que el anterior, además de no tener los problemas de estabilidad relativos a los choques, ya que se ponen topes al final de carrera para evitarlos.
- Variación de hueco fuera de plano: las pletinas vibran fuera del plano de la estructura (figura 103 (c)). En este último caso, la capacidad varía al variar el hueco entre dos grandes placas, consiguiéndose la mayor capacidad de las tres topologías. Por el contrario, es la que más sufre los problemas mecánicos derivados de los esfuerzos y los chasquidos al cerrarse cuando la diferencia de potencial es muy grande entre las placas. Esto se consigue eliminar poniendo un dieléctrico entre las placas, pero también reduce la salida. Por ello la segunda topología es la más utilizada, ya que es la de mejor compromiso entre su salida máxima y problemas mecánicos. A pesar de ello, esta última disposición tiene la gran ventaja de no depender de la frecuencia de la vibración que lo hace mover. En este caso, el sistema es no resonante.

El modo de funcionamiento de estos sistemas se realiza de dos formas distintas: con tensión constante o con carga constante.

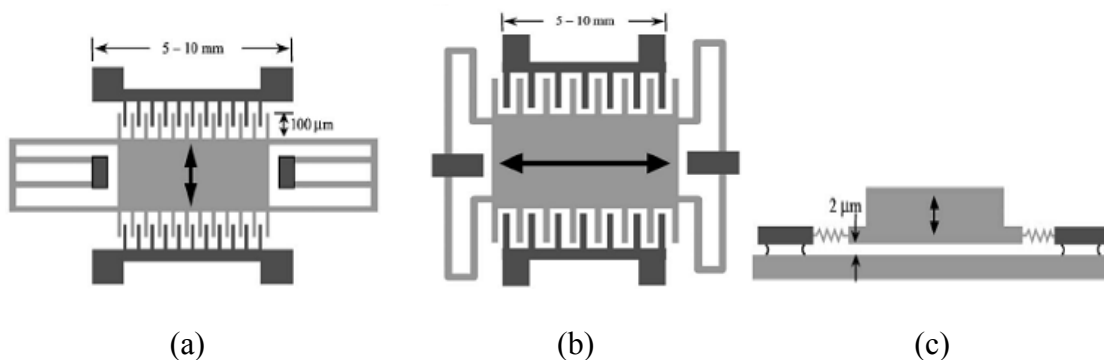


Fig. 103. Tres posibles topologías de microgeneradores electrostáticos.

Un condensador variable inicialmente cargado por una tensión externa al circuito, al separarse sus láminas debido a vibraciones exteriores, varía su valor de capacidad, transformando la energía mecánica en un mayor potencial. Si la tensión en el condensador se mantiene constante, y después de una carga inicial se unen las láminas

por acción de las vibraciones exteriores al sistema, la capacidad  $C$  crece y la carga  $Q$  también. La carga obtenida del condensador ( $Q = CV_{\text{constante}}$ ) se puede almacenar en un condensador de reserva o en la batería de la fuente inicial. La carga restante se recupera mientras la capacidad está al mínimo. Después de esto debemos inyectar carga para compensar la pérdida de ésta en cada descarga del condensador variable hacia la batería.

Una aproximación más práctica es la técnica de carga constante, donde el condensador está en circuito abierto, restringiéndose la carga en él y, por lo tanto, forzando la tensión a cambiar. Como las láminas se separan y la capacidad decrece, la tensión y la energía almacenada en el condensador aumenta ( $Q_{\text{constante}} = CV$  y  $E = 1/2 CV^2$ ). Se precisa sincronización con la frecuencia de vibración para garantizar la carga inicial de las placas a su máxima capacidad y descarga a su punto mínimo de la misma, lo que implica que la tensión y la energía solo aumentan con la vibración [57]. Se ha de tener cuidado con la transferencia de energía al condensador externo de almacenamiento exactamente cuando las placas están separadas al máximo (capacidad mínima) y la tensión en su punto máximo (sobretensión en el condensador de almacenamiento). Este método tiene la ventaja de necesitar una menor tensión inicial que el primer método, aunque aprovecha menos la energía mecánica de la vibración para su transformación en energía eléctrica, ya que la tensión sube al máximo cuando su capacidad está al mínimo, es decir, cuando se deja de aplicar esfuerzo. Para mejorar este apartado se suele poner en paralelo con el condensador del sistema otro condensador, aunque esto obliga a aumentar la tensión de entrada inicial.

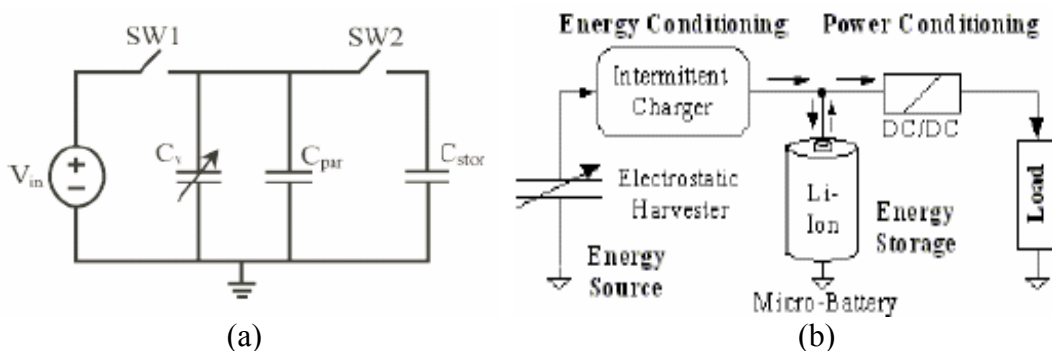


Fig. 104. (a) Circuito equivalente del convertidor electrostático con condensador de almacenamiento externo; (b) Esquema completo del sistema generador.

En el caso de utilizar la fuente de carga inicial como sistema de almacenamiento y una disposición en tensión constante, tenemos un sistema que opera en tres fases separadas: precarga, obtención de energía y recuperación. En la primera fase, el condensador es precargado mediante una batería y un inductor, como se ve en la figura 105. Esta fase de precarga funciona en dos pasos: en el primero se transfiere la energía de la batería al inductor imponiendo la tensión en éste mediante los interruptores  $S1$  y  $S3$ . La corriente por el inductor se incrementa linealmente hasta que se almacena la suficiente energía, abriéndose  $S1$  y  $S3$ . El segundo paso es pasar la energía almacenada en el inductor al condensador conectando  $S2$  y  $S4$ . Cuando la tensión alcanza la de la batería se abren  $S2$  y  $S4$ .

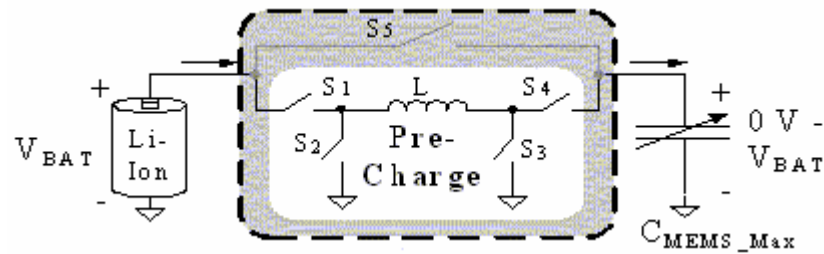


Fig. 105. Etapa de precarga.

Durante la fase de obtención de energía (figura 106), se conecta la batería recargable al condensador mediante S5 para almacenar la energía obtenida mediante las vibraciones externas. Como la batería es una fuente de baja impedancia, la tensión en ésta es prácticamente constante y al decrecer la capacidad se produce una corriente ( $I = C \frac{dV}{dt} + V \frac{dC}{dt} \approx V \frac{dC}{dt}$ ). Aunque esta corriente carga la batería, el incremento resultante en tensión es mínimo porque la magnitud de la corriente es baja debido a que la tensión en el condensador aún no ha variado.

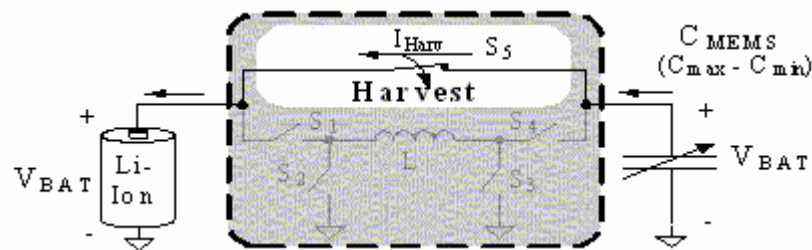


Fig. 106. Etapa de obtención de energía.

Para completar el ciclo, después de alcanzada la mínima capacidad al final de la etapa anterior, la energía que se mantiene en el condensador se recupera con el mismo inductor utilizado en la etapa de precarga (figura 107). La energía residual se transfiere al inductor con S2 y S4 y después se libera a la batería con S1 y S3. Una vez el condensador se ha descargado, su campo eléctrico desaparece y sus placas son libres para moverse y volver a su mínima separación sin necesidad de energía eléctrica.

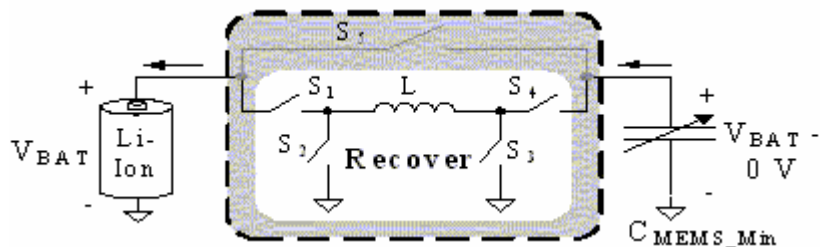


Fig. 107. Etapa de recuperación.

## **Sistemas electrostáticos.**

La ganancia de energía final tiene la siguiente expresión:

$$\Delta E_{\text{max ganada}} = \Delta E_{\text{invertida}} + \Delta E_{\text{obtenida}} + \Delta E_{\text{recuperada}} = \frac{1}{2} (C_{\text{máx}} - C_{\text{mín}}) V_{\text{batería}}^2 \quad (29)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r (A/d) \quad (30)$$

siendo  $A$  el área enfrentada,  $d$  la distancia de separación entre placas y  $\epsilon_0$  y  $\epsilon_r$  la permitividad del aire y del material dieléctrico utilizado entre placas respectivamente.

La característica más atractiva de estos microgeneradores es la facilidad para fabricarlos a escalas muy pequeñas. Es el caso más adecuado para ser introducido directamente en un chip comparado con el resto de métodos de conversión de la energía vibracional. Produce unos niveles de tensión de salida más altos (centenas de voltios en algunos casos), y por tanto más apropiados que los sistemas electromagnéticos, con una densidad de potencia moderada. Los condensadores variables MEMS se fabrican con técnicas para micromáquinas de silicio relativamente antiguas. El movimiento de la lámina del condensador debe ser preferiblemente en paralelo con el sustrato (en el mismo plano) para evitar problemas con los condensadores parásitos que aparecen entre superficie por interacción entre ellas, amortiguamientos mecánicos, etc.

### **2.4.5.3 Proyectos y aplicaciones de microgeneradores electrostáticos.**

**Generador en zapato:** como se verá más adelante, las propiedades intrínsecas de los materiales piezoeléctricos limitan su eficiencia a altas tensiones. Sin embargo, los generadores electrostáticos mejoran su rendimiento a estos niveles de tensión. Tomando esta propiedad, algunos investigadores han desarrollado generadores electrostáticos basados en materiales especiales, llamados polímeros electroactivos o elastómeros dieléctricos, fabricados con gomas de silicona o acrílicos blandos. Estos materiales son extremadamente dóciles, por lo que un desplazamiento de 2 a 6 mm puede fácilmente generar del 50 al 100% de la tensión en el área aplicada, dependiendo de la configuración del generador. Por eso son unos sustitutos ideales para la parte posterior de la suela en las zapatillas de correr. Estos sistemas pueden ser eficientes, con unas densidades de energía de 0.2 J/g, y los cálculos indican posibilidades de alcanzar 1.5 J/g.

El equipo del SRI International ha construido un generador electrostático con elastómeros de este tipo dentro del tacón de una bota. Cuando se pisa el suelo con ella, se aplica una presión a la membrana del elastómero, cuyos globos dentro de la estructura producen una deformación y consecuentemente energía eléctrica cuando se aplica tensión entre los electrodos.

Se tomó una energía de salida de 0.8 J por paso dado para una compresión del tacón de solo 3 mm, generando 800 mW de potencia por zapato a un ritmo de dos pasos por segundo [9]. Un test de durabilidad indicó que el material resistirá al menos 100.000 ciclos de trabajo. Sin embargo el equipo cree que mejorando el ensamblaje y el diseño se puede incrementar la vida hasta más allá del millón de ciclos (período de vida suficiente para unos zapatos normales). El equipo augura una mayor compresión en el zapato

## Sistemas electrostáticos.

comercial, llegando hasta 1 W de potencia, teniendo en cuenta una conversión de tensión del 50% (desde varios kilovoltios hasta 3 V).



Fig. 108. Generador electrostático basado en la compresión de un elastómero dieléctrico cargado: (a) prototipo implementado en una bota; (b) detalle del generador.

Aunque algunos investigadores han desarrollado grandes generadores electrostáticos para aprovechar las vibraciones de baja frecuencia en paredes u otras aplicaciones, los generadores electrostáticos tienden a ser pequeños, a menudo a escala MEMS (siglas en inglés de Sistemas Micro- Electro- Mecánicos), donde se obtiene un gran beneficio al conseguir un incremento de la densidad de energía a partir de una tensión aplicada. Estos sistemas se diseñan para funcionar en un rango de frecuencias entre cientos de hertzios hasta varios kilohertzios, y dependiendo de su excitación y de las condiciones de alimentación, estos sistemas producen del orden de pocos  $\mu\text{W}$ . Con esta potencia se puede alimentar electrónica de muy bajo consumo y es posible incorporarla en el mismo chip del microgenerador.

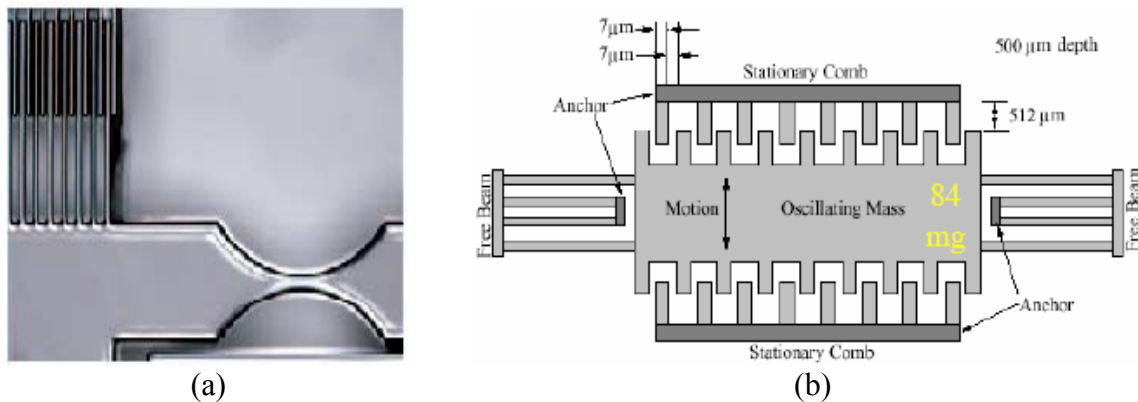


Fig. 109. Generador electrostático fabricado en tecnología MEMS por el MIT: (a) una porción del hueco del condensador; (b) dibujo del sistema.

**Proyecto n°1:** en la figura 109 tenemos un condensador variable de hueco constante entre láminas y plano superpuesto de las mismas, desarrollado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts. A la derecha se pueden apreciar las láminas móviles, unidas a la masa oscilante (84 mg) frente a las fijadas a la estructura en forma de doble peine. La masa incluye un resorte que puede ser flexado, lo cual hace pender sus láminas sobre las de la estructura, permitiendo variar la capacidad. Las láminas del condensador se obtienen mediante la interconexión de puntas que se deslizan juntas y a distancia en el plano horizontal al aplicar una vibración. El sistema fue capaz de producir  $8 \mu\text{W}$  al moverse la masa oscilante medio milímetro a una frecuencia de 2.5 kHz [9] [21].

En este proyecto se utilizaron dos circuitos a modo de prueba con las dos topologías mencionadas anteriormente (tensión o carga constante). En el primer caso (figura 110(a)) se carga el inductor  $L$  con  $C_R$  (reserva de alta tensión) mediante la puesta en funcionamiento de  $M_1$ . Una vez  $L$  alcanza la corriente deseada, se abre  $M_1$  para cargar  $C_L$  gracias al diodo de libre circulación  $D_1$ . Para cargar  $C_M$ , el MOSFET  $M_2$  se enciende, transfiriendo energía de  $C_L$  al inductor  $L$  (de esta forma se cambia el sentido de la corriente). Una vez cargado,  $M_2$  se apaga y la corriente de  $L$  carga  $C_M$  gracias a  $D_2$ . Como  $C_M$  va desde un valor máximo a un mínimo de capacidad cuando descargamos, el diodo  $D_3$  mantiene  $C_M$  a la misma tensión constante que  $C_R$  mientras se transfiere la carga de  $C_M$  a  $C_R$ . Cuando  $C_M$  alcanza de nuevo la capacidad máxima,  $M_2$  se enciende otra vez repitiendo el ciclo. De la misma manera,  $M_1$  se encenderá y apagará para mantener la tensión constante en  $C_L$  cuando se necesite [22]. Los diodos utilizados pueden sustituirse por transistores MOSFET para reducir la caída de tensión si hiciera falta, aunque resultaría en un control más complejo.

En el segundo caso (carga constante) se enciende el MOSFET inferior para cargar el inductor. Una vez cargado, se apaga este MOSFET y se enciende el superior, forzando a  $L$  a descargarse sobre  $C_M$ . Una vez se ha descargado el inductor se apaga el MOSFET superior, aislando el condensador variable cuando va de su capacidad máxima a la mínima, manteniendo constante la carga. Cuando la capacidad alcanza su mínimo valor se comienza a descargar  $C_M$ , encendiéndose el MOSFET superior para cargar el inductor, en este caso en la dirección opuesta (momento de máxima tensión). Una vez descargado completamente el condensador, se apaga el MOSFET superior y se enciende el inferior, descargándose el inductor sobre  $C_R$ .

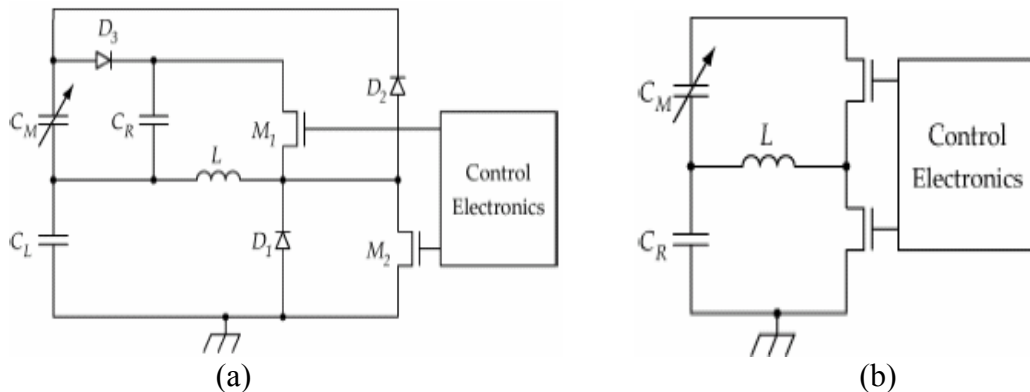


Fig. 110. (a) Circuito electrónico manteniendo la tensión constante; (b) Circuito electrónico manteniendo la carga constante.

Como se puede comprobar, la topología de tensión constante tiene mayores inconvenientes que la de carga constante, dada la necesidad de mayor control del proceso y, por tanto, mayores pérdidas en los componentes.

**Proyecto n°2:** la mayor parte de estos microgeneradores funcionan a una resonancia mecánica determinada, a menudo en un rango de kilohertzios con escala MEMS, lo que hace que no sean adecuados para aprovechar determinadas vibraciones, como por ejemplo las del cuerpo humano. El ser humano al andar o al correr produce vibraciones en un amplio espectro de frecuencias generalmente bajas (hasta cientos de Hz). Debido a ello, algunos investigadores han desarrollado microgeneradores no resonantes. Este es el caso del microgenerador desarrollado por el Imperial College de Londres. Como puede verse en la figura 111, el sistema consta de tres capas: la primera es una base formada por una placa inmóvil con unos contactos de carga; la segunda es una placa suspendida sobre la primera y que puede moverse libremente de forma vertical (aquí se coloca una masa de prueba de 0,3 g). Por último tenemos una tapa en la parte superior, que contiene los contactos de descarga. Para este proyecto se ha diseñado un área activa de 210 mm<sup>2</sup> para el condensador y una capacidad máxima de separación de las láminas de 320 μm [19].

Este tipo de microgeneradores necesita ser precargado, lo cual crea una fuerza de atracción electrostática entre sus placas hasta casi unir las, momento en el que se está preparado para generar. Al producirse un movimiento del sistema, en el cual se alcanza el punto donde la aceleración por la masa excede la fuerza electrostática que mantiene las placas unidas, la placa móvil tiende a separarse incrementando la tensión del sistema.

$$E = \frac{1}{2} q(V_2 - V_1) \quad \text{o} \quad E = \frac{1}{2} V_2^2 (C_2/C_1)(C_1 - C_2) \quad (31)$$

donde  $V_1$  es la tensión de precarga;  $V_2$  la tensión final y  $C_1$  y  $C_2$  son las capacitancias del generador al inicio (cerrado) y al final (abierto).

Las medidas tomadas superan los 300 nJ por ciclo mecánico a 20 Hz (unos 6 μW). Un reciente análisis indica que podemos esperar una densidad de 4 μW/cm<sup>3</sup> [9].

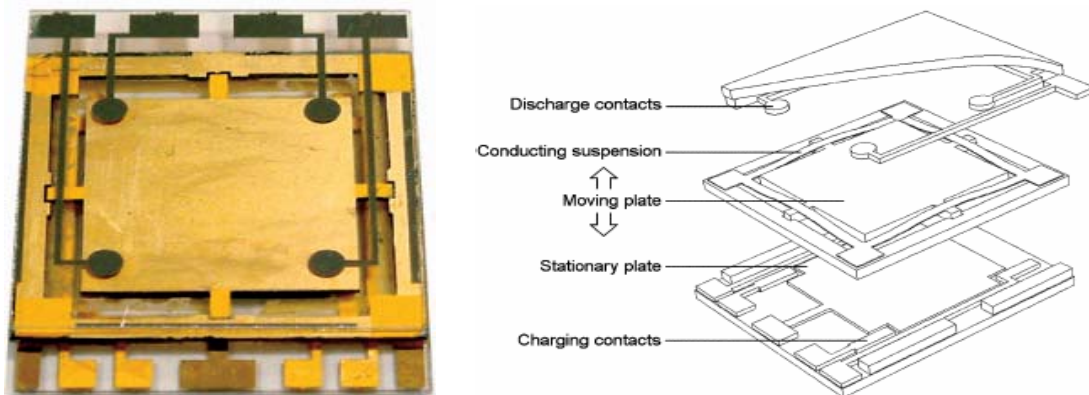


Fig. 111. Microgenerador desarrollado en el Imperial College.

Con una separación máxima de las placas, la tensión máxima obtenida ( $V_2$ ) alcanzaba los 300 V y la capacitancia final ( $C_2$ ) se reducía hasta los 10 pF [19]. Para proceder a la descarga de tal tensión se utiliza un convertidor reductor en medio puente, que reduce esta entrada hasta los 3 V a su salida. Este convertidor contiene básicamente tres semiconductores de alta tensión: un MOSFET como interruptor para la corriente, un diodo para conducir este pico de corriente y otro MOSFET, que solo se enciende para alimentar el controlador de la puerta de este primer MOSFET cuando la tensión del generador es cero (este segundo MOSFET enciende al primero cuando  $V_g = 0$ ).

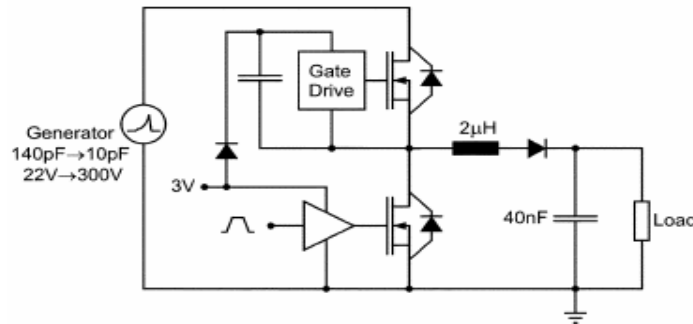


Fig. 112. Imagen del convertidor reductor.

Los convertidores de este tipo funcionan generalmente en dos fases. En la primera se produce la magnetización del elemento inductivo con el aumento de las rampas de corriente en éste al cerrar el MOSFET. En la segunda fase se cierra éste último produciendo la libre circulación de corriente por el diodo. En nuestro caso tenemos cuatro fases: en la primera el interruptor está cerrado mientras la tensión de generación aumenta. Es importante que el interruptor tenga una capacidad pequeña o el generador perderá parte de su carga a través de este condensador parásito y no generará suficiente energía. En la segunda fase se activan los dos MOSFET y la corriente fluye, fijándose la máxima tensión en el diodo. Para reducir pérdidas de conducción y de carga se necesita que los MOSFET y el diodo tengan pequeñas capacidades parásitas. En la tercera fase se corta el segundo MOSFET, dejando que la corriente fluya por el circuito de la carga, creciendo la corriente en la bobina y cayendo la tensión en el generador hasta descargarse completamente. En este punto la corriente en la bobina es máxima. En la cuarta y última fase se abre el primer MOSFET para dejar circular libremente la tensión por el circuito de carga gracias al diodo en antiparalelo.



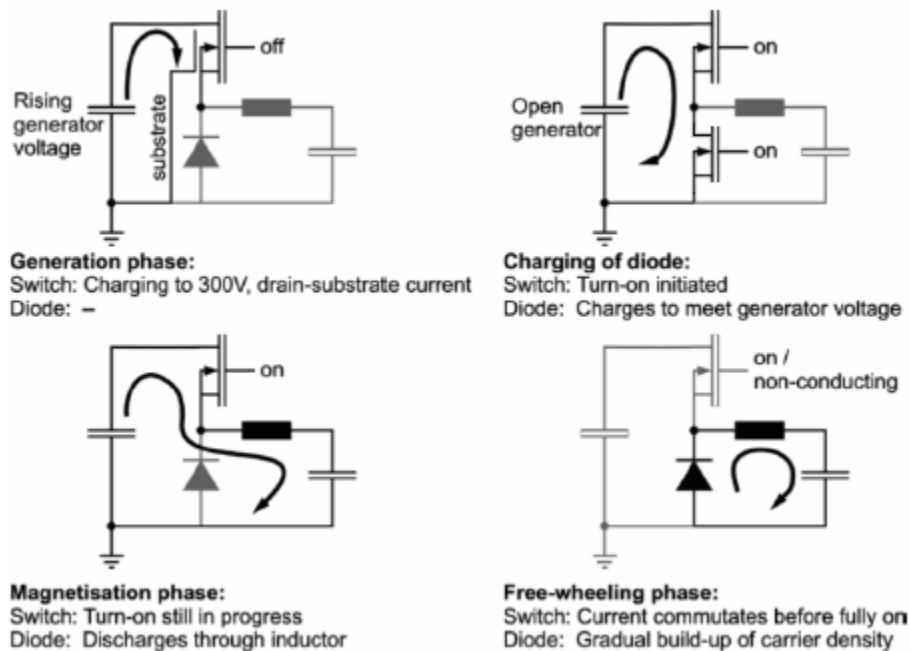


Fig. 113. Las cuatro fases de operación del convertidor reductor.

**Proyecto nº3:** este proyecto conjunto de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong y el laboratorio TIMA de Grenoble (Francia) ha dado como fruto un microgenerador capacitivo con puerta flotante integrada, cuya salida máxima es de 1  $\mu\text{W}$  al vibrar a 4 KHz, con un desplazamiento de 5  $\mu\text{m}$  [18]. Este nivel de salida no es válido para sustentar sistemas electrónicos.

**Aplicaciones en medicina:** en unión con otros sistemas pueden utilizarse con implantes tanto internos como externos aprovechando el movimiento del cuerpo, la respiración pulmonar, etc. Podemos sustentar eléctricamente biosensores que midan la concentración o la presión de la sangre (en el caso de hipertensos), contenido en glucosa (diabéticos), y sean capaces de transmitir los datos al exterior para monitorizarlos y hacer un seguimiento del paciente. También se ha estudiado su integración en redes wireless para pacientes con diferentes fines.

**Interruptor de luz:** un uso conjunto con otro tipo de microgenerador permitiría ampliar la energía recavada y usarla, por ejemplo, para enviar una orden vía radio que haga encender las luces de una habitación. Al pulsar un interruptor mecánico se genera energía suficiente para alimentar un módulo de transmisión, que ordena al sistema integrado en la lámpara encender una bombilla. De esta manera se evitaría la necesidad de tener un cable que conecte el interruptor con la lámpara del techo. Este es un ejemplo de los muchos posibles donde aplicar estos dispositivos en una casa para realizar tareas diferentes (casas inteligentes).

**Reloj despertador:** en esta opción se carga y alimenta un dispositivo mientras se duerme, aprovechando el peso de la cabeza sobre la almohada. De igual manera se puede incluir el sistema en el colchón. Éste estaría formado por el microgenerador junto a una pequeña pila para asegurar la carga, y un pequeño chip de bajo consumo para medir el tiempo y avisar a la hora programada con una sencilla melodía.

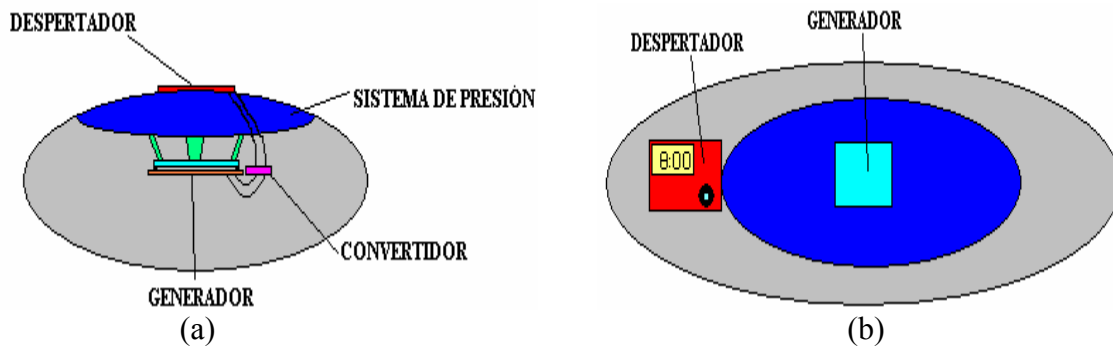


Fig. 114. Generador en almohada: (a) vista lateral; (b) vista aérea.

**Muletas:** se puede añadir un sensor de la fuerza aplicada por parte de un enfermo en sus muletas. También en aplicaciones de radiofrecuencia para producir la apertura rápida de puertas motorizadas a modo de mando a distancia, envío de datos a sistemas estancos o simplemente de cargadores para otros dispositivos.

**Estudio de animales:** se puede pensar en dispositivos integrados en animales para estudiar su comportamiento o hacer un control de los mismos (recuento de individuos).

El conjunto de alimentación y sensado puede incluirse en el cuello o en las patas del animal mediante una correa. El microgenerador proveerá de corriente a los sensores a partir del movimiento. En este sentido puede considerarse como aplicación de las ya mencionadas RFID tags.

### **2.4.5.4 Conclusiones.**

Este tipo de sistemas son grandes promesas de futuro en distintos campos por su estabilidad y facilidad de miniaturización con tecnología MEMS. Son compatibles con la tecnología actual y su integración en casi cualquier ámbito es posible. De esta forma aumenta su competitividad frente a sistemas electromagnéticos o piezoeléctricos.

Las principales desventajas de estos sistemas son su baja potencia de salida y sus altas frecuencias de utilización. La densidad de potencia máxima estimada para la mayoría de estos microgeneradores es de unos pocos  $\mu\text{W}$  por  $\text{cm}^3$  [10], a pesar de sus elevadas tensiones en circuito abierto (cientos de voltios en algunos casos). A esto hay que sumarle la necesidad de una fuente inicial que aporte la carga que necesitamos, lo que complica el control del sistema electrónico y aumenta las pérdidas en los componentes. Las altas tensiones que se suelen obtener (también hay sistemas de este tipo que obtienen tensiones bajas) tampoco ayudan a la hora de reducir componentes. Estos sistemas tienen, al igual que todos los sistemas vibracionales, partes móviles que sufren desgaste con el tiempo, disminuyendo el rendimiento y el tiempo de vida del dispositivo. En este sentido se han desarrollado polímeros que consiguen simplificar la estructura del conjunto y ganar en energía final. Estos materiales son dieléctricos, lo que permite tener aislados ambos electrodos entre sí, además de conseguir deformaciones suficientemente altas sin producirse choques ni flexiones de la estructura. Todo el conjunto está así protegido por un material aislante y flexible que ofrece la deformación necesaria para que las placas se muevan sin entrar humedades. Además son materiales muy baratos y fácilmente disponibles.

## **2.4.6 SISTEMAS PIEZOELÉCTRICOS.**

### **2.4.6.1 Introducción.**

La palabra “piezo” se deriva del griego y significa estrechar, apretar u oprimir. En 1880, Jacques y Pierre Curie descubrieron que al aplicar esfuerzos mecánicos a un cristal de cuarzo se establecían cargas eléctricas en éste. Por tal motivo llamaron a este fenómeno “el efecto piezoeléctrico”. Más tarde se dieron cuenta de que un campo eléctrico aplicado al mismo cristal provocaba una deformación en éste. A este efecto lo llamaron “efecto piezoeléctrico inverso”. Los materiales piezoeléctricos pueden, por tanto, ser utilizados para convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa [33].

Después de su descubrimiento pasaron varias décadas antes de que se utilizara el fenómeno piezoeléctrico con fines industriales. La primera aplicación comercial fue en detectores ultrasónicos para submarinos desarrollados en la 1ª Guerra Mundial, y en la década de los cuarenta los científicos descubrieron que ciertos materiales cerámicos, como el titanato de bario, tenían cualidades piezoeléctricas en presencia de un campo eléctrico.

Actualmente el efecto piezoeléctrico es a menudo encontrado en la vida diaria. Un ejemplo de ello son los encendedores de gas para cigarrillos o para parrillas en estufas de gas. En ellos, una palanca aplica presión a un cristal piezoeléctrico creando un campo eléctrico lo bastante fuerte para producir una chispa que encienda el gas. Además, los relojes con alarma utilizan a menudo elementos piezoeléctricos para sus altavoces. Cuando una tensión alterna es aplicada, el material piezoeléctrico se mueve a la frecuencia de dicha tensión, y el sonido resultante es lo bastante alto como para despertar a una persona dormida.

### **2.4.6.2 El efecto piezoeléctrico: funcionamiento y materiales.**

Existen materiales naturales, tales como el cuarzo, la turmalina, la sal de Rochelle, etc, cuyas cualidades piezoeléctricas son muy reducidas. Por ello se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas, siendo principalmente de naturaleza cerámica ferromagnética o polimérica. De la primera clase hay varias cerámicas desarrolladas (berlinita, tantalato de litio, etc), siendo los PZT (zirconato titanato de plomo) los más ampliamente utilizados. En el caso de los polímeros es el PVDF o poli(fluoruro) de vinilideno el más desarrollado. La eficiencia en la transformación de energía mecánica a eléctrica suele ser de 0,5% para los PVDF y entre 1,5% y 5% para los PZT [8].

Los cerámicos PZT, disponibles en muchas formas, tamaños y variaciones según las proporciones de cada elemento que forma el piezoeléctrico, son los materiales más ampliamente usados para aplicaciones como actuadores. Éstos tienen una fórmula general  $A^{2+} + B^{1+} + O^{2-}$ , donde A es un gran ión metálico divalente, como el bario o el plomo, y B denota un ión metálico tetravalente, como el titanio o el zirconio. Los materiales PZT son considerados como una masa de pequeños cristallitos. A una temperatura por encima del

conocido como punto de Curie, estos cristalitos exhiben una simetría cúbica simple (isotrópica), perdiendo por completo sus propiedades piezoeléctricas debido a la cancelación de dominios. Esta estructura es simétrica en el centro, con lados coincidentes de cargas negativas y positivas, con lo que no hay formación de dipolos. Por debajo del punto de Curie, sin embargo, los cristales toman una simetría tetragonal (anisotrópica), donde los lados de carga positiva y negativa ya no coinciden, formándose dipolos que pueden ser revertidos si se quiere en función de la dirección del campo eléctrico que apliquemos. A la temperatura de Curie, los cerámicos PZT pierden las propiedades piezoeléctricas.

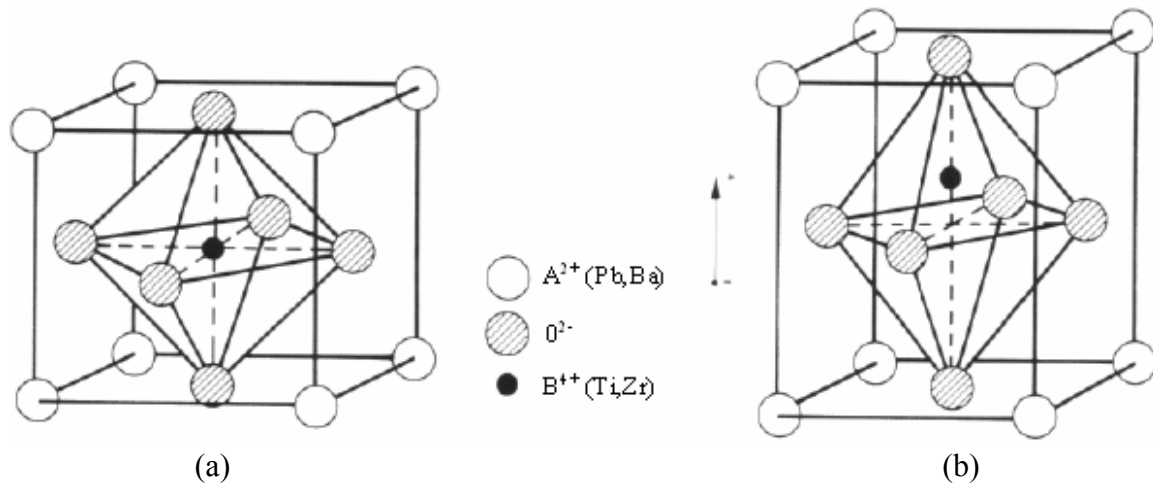


Fig. 115. Celda elemental del PZT.

- (a) estructura cúbica (por encima de la temperatura de Curie);
- (b) estructura tetragonal (por debajo de la temperatura de Curie).

La razón del comportamiento como dipolo eléctrico es la separación entre los iones de carga positiva y negativa. Una región de dipolos eléctricos con orientación similar es llamada dominio. A los grupos de dipolos con orientación paralela se les llama dominio de Weiss. El dominio de Weiss está orientado aleatoriamente en el grueso del material del PZT, antes de que el tratamiento de polarización sea efectuado. Para este propósito se aplica un campo eléctrico ( $>2000V/mm$ ) al piezocerámico (calentado) [33]. Con el campo aplicado, el material se expande a lo largo del eje del campo y se contrae perpendicularmente a este eje. Los dipolos eléctricos se alinean y permanecen rígidamente alineados hasta su enfriamiento. El material tiene ahora una polarización permanente, la cual puede ser degradada si se exceden los límites mecánicos, térmicos y eléctricos del material. Como resultado hay una distorsión que causa un aumento en las dimensiones alineadas con el campo y una contracción en los ejes normales al campo.

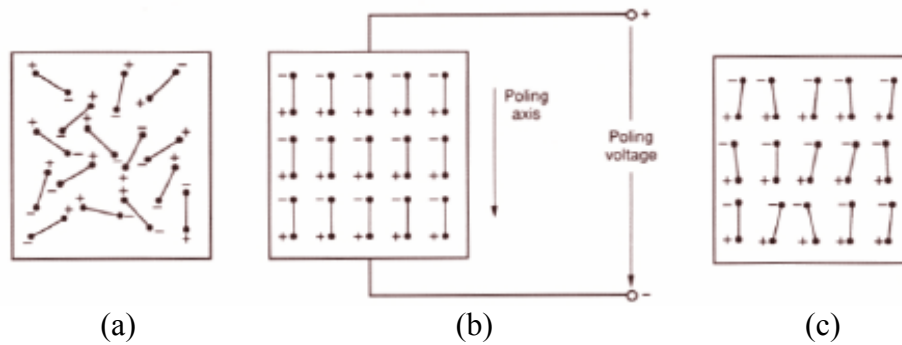


Fig. 116. Momentos del dipolo eléctrico en el dominio de Weiss: (a) antes de la polarización; (b) durante la polarización; (c) después de la polarización.

Cuando un voltaje es aplicado a un material piezoeléctrico polarizado, el dominio de Weiss aumenta su alineamiento proporcionalmente al voltaje. El resultado es un cambio en las dimensiones (expansión, contracción) del PZT.

Las principales constantes de los materiales piezoeléctricos son [49]:

Permitividad ( $\epsilon_{xy}$ ): la permitividad absoluta o constante dieléctrica es el desplazamiento dieléctrico por unidad de campo eléctrico. El primer número  $x$  da la dirección del desplazamiento dieléctrico, y el segundo número  $y$  da la dirección del campo eléctrico. Por ejemplo,  $\epsilon_{11}$  es la permitividad de un piezoeléctrico para un desplazamiento dieléctrico y un campo eléctrico en la dirección 1. Puede producirse en condiciones de deformación constante ( $\epsilon^S$ ) o con condiciones de esfuerzo constante ( $\epsilon^T$ ). Interesa que esta constante sea lo más pequeña posible. Para algunos materiales PZT varía entre 0 y 180.

Conformidad ( $s_{xy}$ ): es la deformación producida por unidad de esfuerzo aplicado. Es el recíproco del módulo de elasticidad. El primer número  $x$  se refiere a la dirección de la deformación y el segundo ( $y$ ) a la dirección del esfuerzo. Por ejemplo,  $s_{36}$  indica la deformación producida en la dirección 3 por unidad de esfuerzo producido en la dirección 6. Todo esto se puede realizar con condiciones de campo eléctrico constante ( $s^E$ ) o con desplazamiento eléctrico constante ( $s^D$ ).

Constante de carga piezoeléctrica ( $d_{xy}$ ): es la polarización eléctrica generada en el material por unidad de estrés aplicado. El primer número  $x$  se refiere a la dirección de la polarización generada en el material (con  $E = 0$ ). El segundo número  $y$  es la dirección del estrés aplicado. Por ejemplo,  $d_{31}$  es la polarización inducida en la dirección 3 por unidad de estrés aplicado en la dirección 1. Para los PZT esta es en torno a 300 o más ( $d_{33}$ ).

$$d_{ij} = \frac{D^E}{T} = \frac{\text{densidad de carga con campo } E \text{ cte } (\hat{i})}{\text{estrés mecánico aplicado } (\hat{j})} \quad (32)$$

Constante de tensión piezoeléctrica ( $g_{xy}$ ): es el campo eléctrico generado en el material por unidad de estrés mecánico aplicado a éste. El primer número x se refiere a la dirección del campo eléctrico generado en el material. El segundo número y se refiere a la dirección donde hemos aplicado el estrés. En el caso de  $g_{31}$ , se indica el campo eléctrico inducido en la dirección 3 por unidad de estrés aplicado en la dirección 1. En los materiales PZT ronda un valor de 25 ( $g_{33}$ ).

$$g_{ij} = \frac{E^D}{T} = \frac{\text{campo E a circuito abierto } (\hat{i})}{\text{estrés mecánico aplicado } (\hat{j})} \quad (33)$$

El factor de unión o acoplamiento ( $k$ ): es una medida de la efectividad con la cual la energía mecánica es transformada en eléctrica y viceversa. Para un PZT, este factor suele estar en torno al 0,6%. Su expresión viene dada por:

$$k_{ij} = \sqrt{\frac{\text{energía eléctrica almacenada } (\hat{i})}{\text{energía mecánica aplicada } (\hat{j})}} \quad (34)$$

Las ecuaciones constitutivas de un material piezoeléctrico lineal bajo unos niveles pequeños de esfuerzo son:

$$X = s^D X + g D \quad \text{y} \quad E = -g X + \beta^X D \quad (35)$$

, donde x es el estiramiento del material, D es el desplazamiento eléctrico, E es el campo eléctrico, s es la constante elástica,  $\beta$  es la susceptibilidad dieléctrica y g es el coeficiente de tensión del piezoeléctrico, cuya ecuación viene expresada por:

$$g = d / \epsilon_0 \epsilon^x \quad (36)$$

, donde **d** es la constante piezoeléctrica del material,  $\epsilon_0$  la constante dieléctrica del aire y  $\epsilon$  es la constante dieléctrica del material.

Una fuerza  $F = X A$ , donde A es el área, la tensión de salida en circuito abierto del PZT se puede expresar como:

$$V = E t = -g X t = - (g F t) / A \quad (37)$$

, donde **t** es el grosor del piezoeléctrico.

La carga generada se determina como:  $Q/V = \epsilon_0 \epsilon^x A / t = C$ , siendo **C** la capacidad del material. Esto hace que a bajas frecuencias se considere el piezoeléctrico como un condensador de placas enfrentadas o en paralelo.

Como se dijo anteriormente, la dirección de los dipolos cambia en función de la dirección del campo magnético (cualidad de magnetismo en los materiales ferromagnéticos). Esto hace que se tengan características como el efecto de histéresis. Según esto, llega un momento que al aumentar el campo eléctrico no aumenta la

## Sistemas piezoeléctricos.

polarización, ya que los dipolos están todos completamente alineados con el campo (saturación de polarización).

Además de lo anterior, la estabilidad de los piezoeléctricos puede variar con el medio, producirse despolarizaciones eléctricas (exponer al material a un fuerte campo eléctrico con polaridad opuesta al campo inicial), mecánicas (esfuerzos elevados sobre el piezoeléctrico que distorsiona la orientación de los dominios y destruye el alineamiento de los dipolos) o térmicas (al calentarse hasta el punto de Curie, los dominios se desordenan y el elemento piezoeléctrico se despolariza).

Propiedad	Unidad	PVDF	PZT-5A	BaTiO3
Densidad	103 Kg/m <sup>3</sup>	1,78	7,5	5,7
Permitividad relativa	$\epsilon/\epsilon_0$	12	1200	1700
d31	10 <sup>-12</sup> C/N	23	-171	78
g31	10 <sup>-3</sup> Vm/N	216	-11,4	5
k31	10 <sup>-2</sup>	12	34,4	21
d33	10 <sup>-12</sup> C/N	-33	374	149
g33	10 <sup>-3</sup> Vm/N	-330	24,8	14,1
k33	10 <sup>-2</sup>	15	70,5	48

Tabla 10. Comparativa de materiales piezoeléctricos de uso común.

Actividad	Pérdidas mecánicas de potencia	Eficiencia electro-mecánica	Pérdidas de potencia eléctrica	Actividad diaria	Potencia eléctrica disponible
Escribir a máquina	10%	50%	10%	16,6%	283,5 $\mu$ W
Movimiento de miembros superiores	50%	11,2%	10%	16,6%	24,6 mW
Respirar	10%	11,2%	10%	100%	74,8 mW
Andar	75%	50%	10%	16,6%	1,265 W

Tabla 11. Energía eléctrica disponible en el cuerpo humano utilizando piezoeléctricos.



### 2.4.6.3 Aplicaciones y proyectos.

Algunas de las aplicaciones actuales de los materiales piezoeléctricos son las siguientes:

#### Microgenerador piezoeléctrico montado en un zapato.

**Proyecto n°1:** este proyecto fue presentado en 1995 por la Universidad de Pittsburg con el objetivo de alimentar órganos artificiales. Se compone de dos tubos cilíndricos en la plantilla de cada zapato. Cada uno contiene una pila de elementos piezoeléctricos situados en su zona más inferior. El sistema funciona de forma que al pisar (primero se pisa con la parte de atrás), el fluido va desde un depósito situado en la zona trasera hasta la zona delantera del pie siguiendo el esfuerzo de la pisada. Para conseguir una mayor presión a lo largo del conducto se ha creado un ensanchamiento en el centro del tubo. Este ensanchamiento realiza la función de depósito intermedio para impulsar el fluido hacia delante cuando el esfuerzo de la pisada se aplica en el centro. El esfuerzo finalmente generado se aplica en la superficie de los piezoeléctricos.

El prototipo era algo pesado y voluminoso, ya que el zapato contenía por entero el generador. Al andar se obtenían potencias medias entre 250 y 700 mW dependiendo del paso del usuario y de su peso [12]. Un ejercicio simulado corriendo despacio produjo 2 W de potencia.

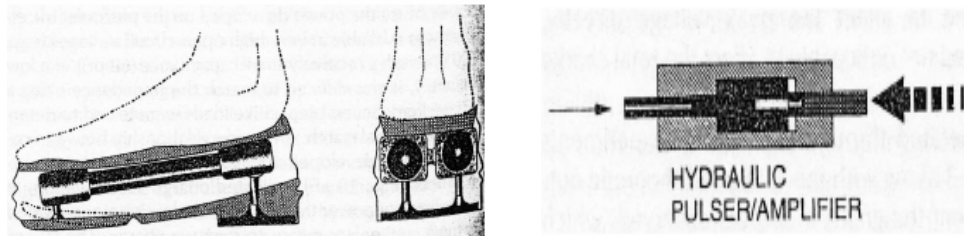


Fig. 117. Sistema piezoeléctrico de la Universidad de Pittsburg.

**Proyecto n°2:** Nesbitt Hagood del MIT diseñó una versión más moderna del proyecto anterior utilizando tecnología MEMS. Cada zapato incorpora 3 piezoeléctricos, con una válvula cada uno para controlar el paso del fluido desde una región superior, donde se produce alta presión al pisar, hasta una cavidad en la cual se disponen los piezoeléctricos. Esta cavidad es capaz de desplazarse hasta 8 mm, generando cada uno de los elementos hasta 1 W de potencia (resonando a 20 kHz), siendo por tanto capaz de generarse hasta 3 W teóricos por zapato [12]. Tras finalizar un paso, se abren las válvulas de retorno del fluido a su depósito.

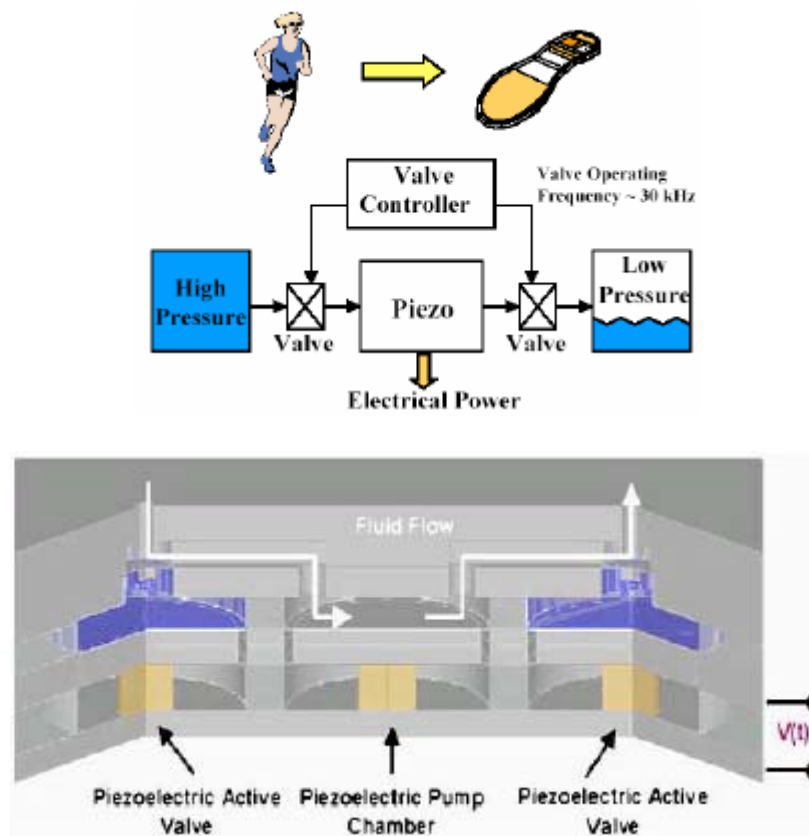


Fig. 118. Partes del sistema y su esquema de funcionamiento (MIT).

**Proyecto n°3:** un proyecto más sencillo que los anteriores fue construido en 1998 y refinado en 1999 por Nathan S. Shenck en el MIT como tema para su tesis doctoral. El prototipo se basaba en aprovechar directamente la energía aplicada sobre la plantilla del zapato. Para ello se colocaron bajo ésta dos tipos de material piezoeléctrico: dos PZT, fabricados en forma ovalada para el talón y un área de material PVDF para la zona delantera, gracias a su mayor flexibilidad. Los PZT son un modelo Thunder TH-6R de la empresa Face International, con una potencia media de aproximadamente 10 mW y picos de hasta 50 mW [61]. En la zona delantera se tienen 28 capas de láminas finas de PVDF embebidas en material plástico flexible de 2mm. Este piezoeléctrico tiene una potencia media de 1 mW con picos de menos de 10 mW. La generación se produce básicamente mediante esfuerzos de flexión en la dirección  $d_{31}$  y de compresión en la  $d_{33}$ .

Debido a su limitada eficiencia en la conversión electromecánica (aproximadamente el 1%), la media de energía recogida fue pequeña: 8,4 mW en el talón y 1,3 mW en la parte delantera al caminar normal [41]. Sin embargo no hubo problemas para integrar el sistema en el zapato. Cada zapato produjo suficiente energía para transmitir un código ID de 12 bits mediante una radio de a bordo hasta el área local cubierta por la persona con los zapatos.

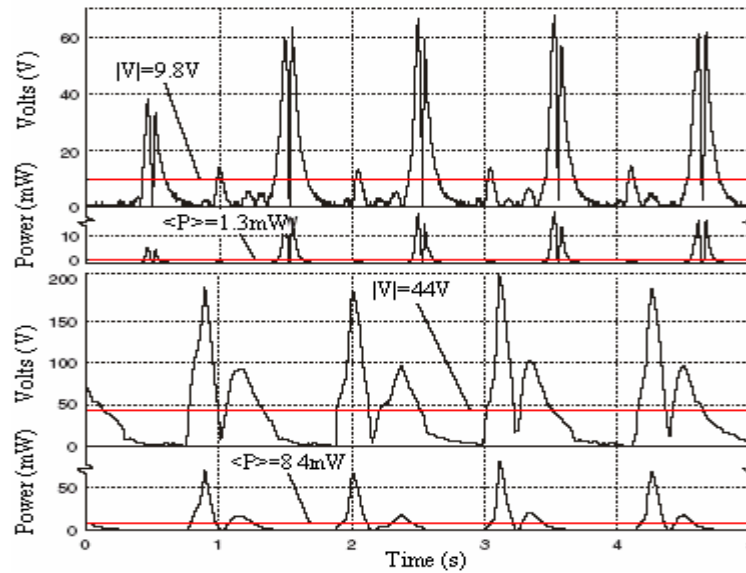


Fig. 119. Energía de los piezoeléctricos: PZT (abajo) y del PVDF (arriba).

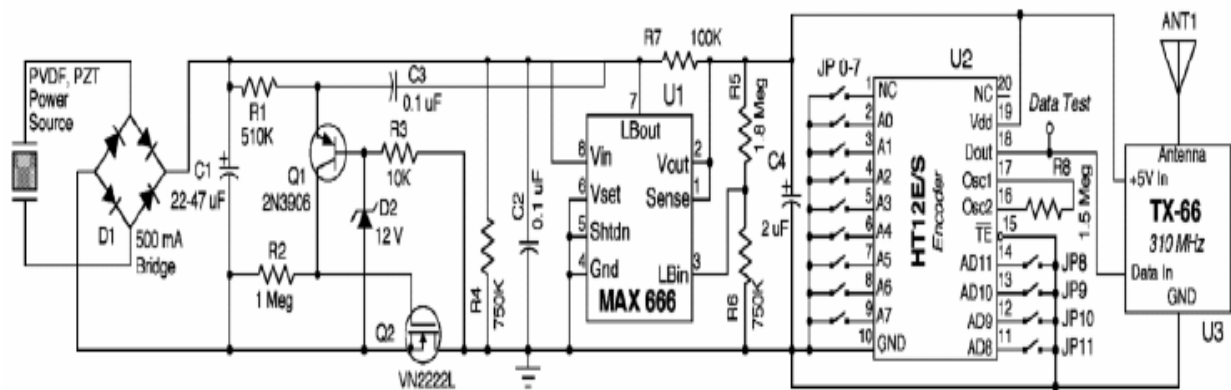


Fig. 120. Circuito electrónico del sistema.

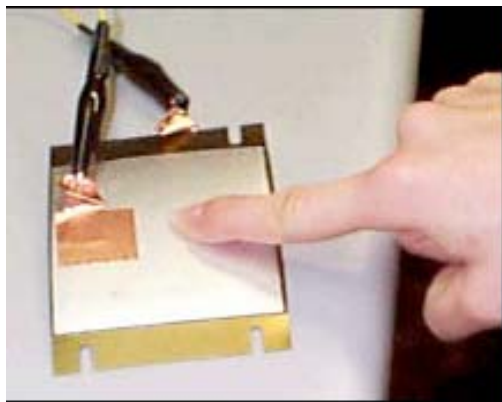
En cuanto al diseño se puede ver el esquema eléctrico del sistema en la figura 120. La señal del piezoeléctrico es rectificada por el puente de diodos y almacenada en el condensador C1, siempre y cuando esta tensión supere el nivel de tensión que ya hay en C1 más las tensiones en directa de los dos diodos que rectifican. Cuando C1 se carga hasta los 12,6 V aproximadamente, (la tensión inversa del zener Z1 más la tensión base-emisor de Q1) se fuerza a Q1 a conducir. Éste a su vez permite que el transistor Q2 pueda activarse, lo que proporciona un camino de regreso de la corriente del regulador a C1.

El regulador proporciona una tensión estable de 5 V al encoder mientras C1 mantenga la tensión del regulador por encima de 5 V. Cuando la tensión en la salida del MAX666 cae hasta los 4,5 V aproximadamente, la tensión del pin LBin baja por debajo del umbral interno con el que se compara (fijado mediante R5 y R6), emitiendo un pulso

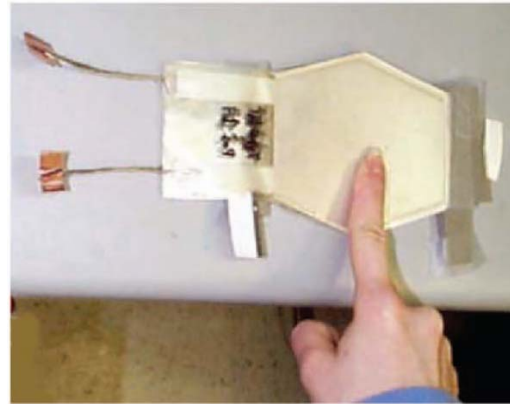
## Sistemas piezoeléctricos.

del nivel de tierra por LBout. Al suceder esto se desactiva Q1, el cual desactiva el transistor Q2, abriéndose el camino que permite la descarga de C1 sobre el regulador. De esta manera se procede de nuevo a cargar C1. Las resistencias R1, R2 y R3 sirven para evitar corrientes de descarga de C1 por sus redes. R4 y C2 filtran la señal para reducir los efectos del ruido y del rizado.

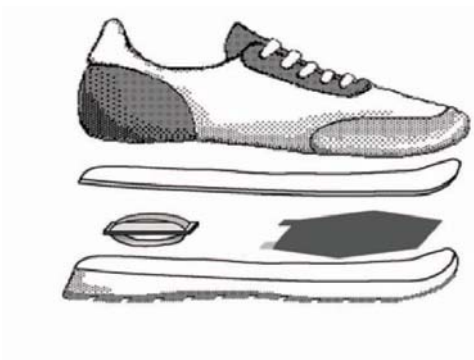
La aplicación práctica del sistema era transmitir un código de identificación de usuario. Una estación local es capaz de recibirla y reconocer al emisor. También es posible su uso en sistemas de posicionamiento para personas y dispositivos de medida de variables en atletas entre algunas ideas [61].



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 121. (a) PZT del talón; (b) PVDF para la parte delantera; (c) Disposición; (d) Sistema terminado con su electrónica de conversión, sistema de almacenamiento, codificador ID y transmisor a 300 MHz.

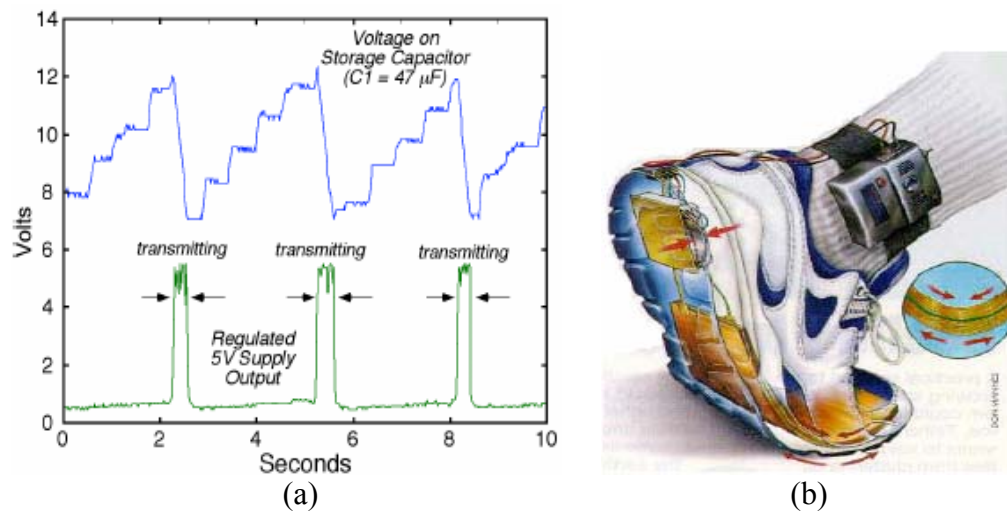


Fig. 122. (a) Gráfico de tensión-tiempo en el condensador de almacenamiento y en la transmisión; (b) Dibujo del sistema completo.

### Generación a partir del ruido ambiente.

En este proyecto se aprovecha la energía de las ondas de ruido atmosférico, haciendo que éstas produzcan una vibración y, por tanto, una deformación en un elemento piezoeléctrico gracias a una superficie concentradora de ondas (micrófono). Se trata al fin y al cabo de realizar el efecto contrario que en los altavoces piezoeléctricos insertados en los despertadores y demás aparatos con alarma.



Fig. 123. (a) Generador piezoeléctrico; (b) Concentrador de sonido.

Como se ve a la izquierda, el sistema es igual a un micrófono de cristal, pero funciona al revés, aprovechándose la deformación de una lámina de material piezoeléctrico sujeto a un diafragma, que vibra a partir del ruido atmosférico y vibraciones.

En la figura 123 (b) tenemos una antena parabólica, que mejora razonablemente la concentración de ondas en el diafragma. Esta disposición será mejor cuanto mayor

## Sistemas piezoeléctricos.

diámetro tenga la antena, pero debido a que buscamos un sistema muy pequeño, no cabe la posibilidad de incluirla.

Las energías obtenidas dependen de la capacidad del cristal piezoeléctrico y de la densidad de ondas sobre el diafragma. Esto implica la total dependencia del medio, por lo que se aplica en lugares con gran intensidad de ruido (aeropuertos, estaciones de tren, etc), y conseguir así una media aceptable de energía. Para aprovechar las ondas ambientales es necesario que el micrófono no se mueva. De esta manera aprovecharemos solo el ruido y pequeñas vibraciones del suelo donde se instale.

Una posible aplicación puede ser la de alimentar luces de señalización en obras de carretera, o luces de indicación en vías del tren. El sistema habría de ponerse cerca de las vías y debería quedar herméticamente cerrado dentro de una caja. Otras aplicaciones pueden incluir las ya mencionadas RFID tags pasivas (Radio Frequency IDentification), las cuales se alimentan únicamente de ondas de radio que recibe en su antena. Estos sistemas se utilizan preferentemente para alimentar sensores, con un consumo de 1 a 100  $\mu\text{W}$ . Sensores que en un futuro serán tan pequeños que podrán ser introducidos directamente en el cuerpo para medir y monitorizar la presión sanguínea. También como sensores de presión o fricción en estructuras.



Fig. 124. (a) RFID tags utilizadas en librerías; (b) RFID tag usada como detector en peajes.

## Microgenerador en implante ortopédico.

En este proyecto se ha introducido un sistema electrónico con el fin de estudiar la evolución de los diversos componentes de una prótesis implantada en la rodilla de una persona. Esto es debido al gran número de problemas surgidos en implantes reales, que han tenido que reemplazarse por otros con el consiguiente trastorno para el paciente.

Los implantes en una pierna, y particularmente en la rodilla, son especialmente complejos por ser el lugar donde se concentran los mayores esfuerzos de compresión de todo el cuerpo. Esto provoca desalineamiento de componentes, hinchazones, degradación del hueso, o en casos extremos, la pérdida del mismo. Es por ello que conocer el comportamiento de los distintos materiales en el tiempo es de vital importancia, con lo que se ha diseñado, junto con el nuevo implante, un sistema electrónico que medirá pérdidas de alineación, deterioro de componentes, fuerzas anormales, detección de desligamientos, etc que serán almacenados y enviados de manera no invasiva para su estudio por el terapeuta y/o el cirujano.



Uno de los mayores problemas es la alimentación de la electrónica por el tamaño y la recarga de las baterías. Por ello se ha decidido introducir como fuente de energía tres pequeños componentes piezoeléctricos, que aseguran la alimentación del sistema aprovechando la compresión del sistema ejercida por el peso del cuerpo.

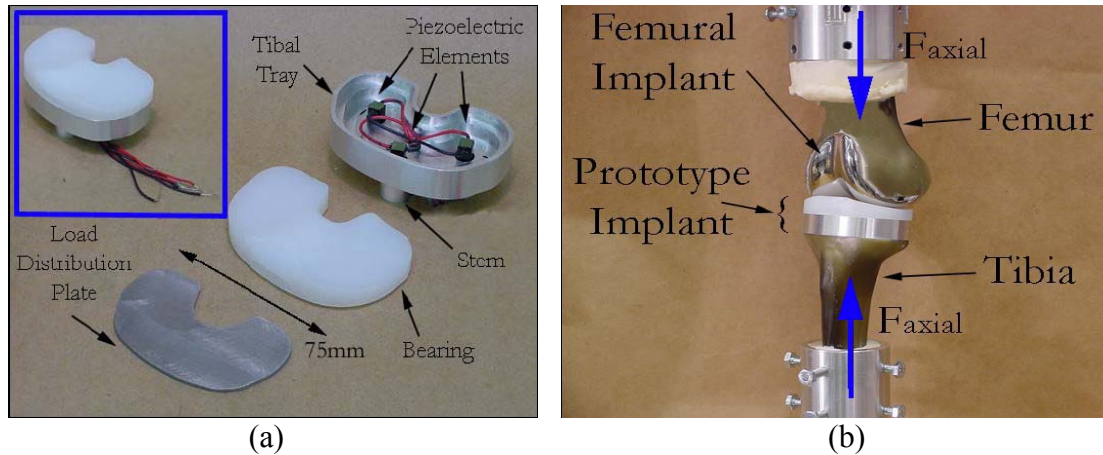


Fig. 125. (a) Elementos del sistema; (b) Implante completo.

El sistema externo se compone de: un implante en el fémur, que ejercerá la fuerza sobre el implante de la tibia. En la tibia tenemos una estructura de aluminio que alberga una superficie blanca de material duro, pero con cierta elasticidad para absorber los impactos del fémur (el implante requiere que la deflexión de la superficie blanca sea pequeña ( $<10 \mu\text{m}$ )). Una placa metálica va debajo de ella, montada sobre los componentes piezoeléctricos para que las fuerzas de compresión sean más eficaces. Éstos van montados en la estructura de aluminio en forma de triángulo para asentar los elementos superiores.

Los tres componentes piezoeléctricos son de material cerámico PZT. Se ha de indicar que se utilizaron dos topologías diferentes: en la primera se usó en cada componente un único elemento piezoeléctrico cilíndrico de 2 cm de longitud y 1 cm de diámetro, lo que proporciona una baja capacitancia ( $\approx 47 \text{ pF}$ ) y una gran tensión en circuito abierto ( $>10,000 \text{ V}$ ). La segunda se compone de una pila de elementos piezoeléctricos ( $\approx 145$ ) ensamblados entre sí formando un cilindro. Cada uno de los elementos tiene un par de electrodos y está unido eléctricamente en paralelo con el resto. Al incrementar el número de capas incrementamos la capacitancia ( $\approx 1\text{-}10 \mu\text{F}$ ) y disminuimos la tensión de pico en circuito abierto ( $\approx 30 \text{ V}$ ). En este último caso, la longitud del cilindro resultante es de 1.8 cm.

Como sistema de generación y almacenamiento tenemos los tres componentes piezoeléctricos (eléctricamente equivalentes a tres fuentes de tensión alterna con sus resistencias en serie o de corriente con resistencias en paralelo), tres puentes de diodos (rectificadores) para obtener corriente continua, un condensador de almacenamiento (para este caso  $C_b = 10 \mu\text{F}$ ) y una resistencia de carga (en este caso  $R_L = 9.76 \text{ k}\Omega$ ).

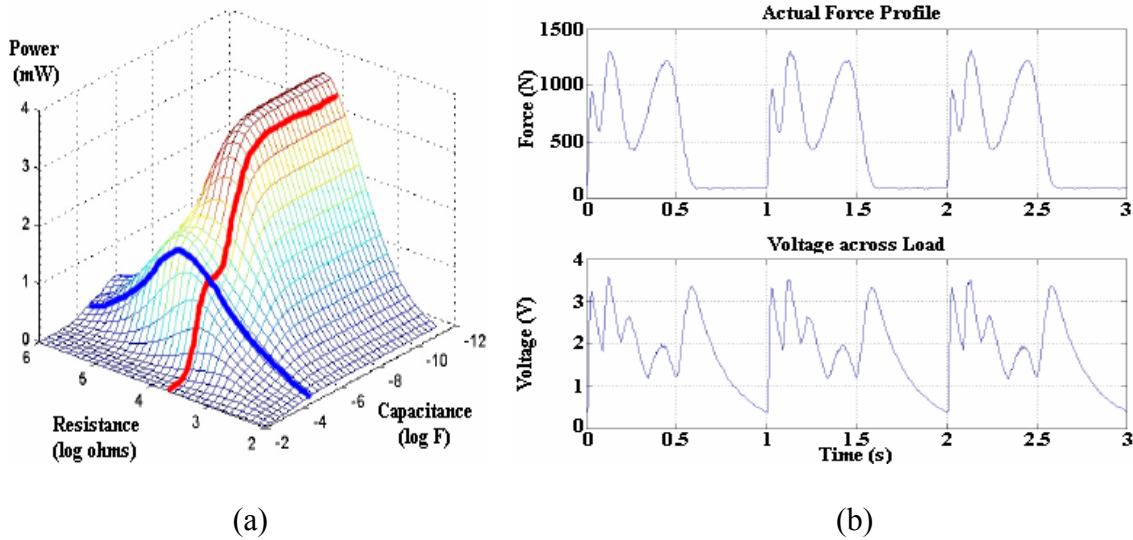


Fig. 126. (a) Gráfico tridimensional de relación potencia-resistencia-capacitancia; (b) Gráfico de la fuerza aplicada y de la tensión para la carga en el tiempo.

El gráfico tridimensional de la izquierda muestra que la máxima energía circula por la carga cuando el condensador de almacenamiento es pequeño y la carga se iguala a la impedancia de la fuente. Cualquier combinación de una carga y un condensador de almacenamiento escogidos para minimizar el nivel de rizado desplazará el punto de operación hacia las regiones de baja transferencia de energía. Lógicamente interesa tener físicamente un valor pequeño para el condensador debido al tamaño, pero aumenta notablemente el nivel de rizado en la tensión por la carga. Un condensador más grande reduce el rizado de tensión, pero si su valor es demasiado alto perdemos eficiencia en la producción de energía, resultado de trabajar a baja frecuencia. Para mejorar dicha eficiencia habrá que aplicar la capacidad natural de los elementos piezoeléctricos. Haciendo esto se logran potencias hasta  $850 \mu\text{W}$  ( $327 \mu\text{A}$  y  $2.6 \text{ V}$ ) bajo las máximas condiciones de fuerza ( $2600 \text{ N}$ ), con una eficiencia del 19 % y una carga de  $7.37 \text{ k}\Omega$  [39].

El sistema utilizado para cuantificar la cantidad de energía disponible, comprobando la tensión en distintos tipos de carga esta formado por un regulador lineal de tensión MAX666 de bajo consumo y un microcontrolador PIC16LF872. Este microcontrolador tiene todas las características necesarias para realizar comprobaciones y tareas de diagnóstico. Puede contar el número de pasos dados, contando el tiempo de cada ciclo (que además podemos ver mediante un diodo led, encendido mientras dura la fuerza aplicada a los piezoeléctricos), picos de fuerza y distribución de la misma comprobando la tensión rectificada de los elementos piezoeléctricos, etc. Todos los datos quedan almacenados en memoria no volátil interna hasta su descarga en la próxima visita médica del paciente. Hay que destacar que, incluso reduciendo las condiciones de fuerza al 50% y usando una carga de  $29.77 \text{ k}\Omega$  se obtienen aproximadamente  $225 \mu\text{W}$ , suficiente para alimentar los aproximadamente  $50 \mu\text{W}$  del PIC [39].



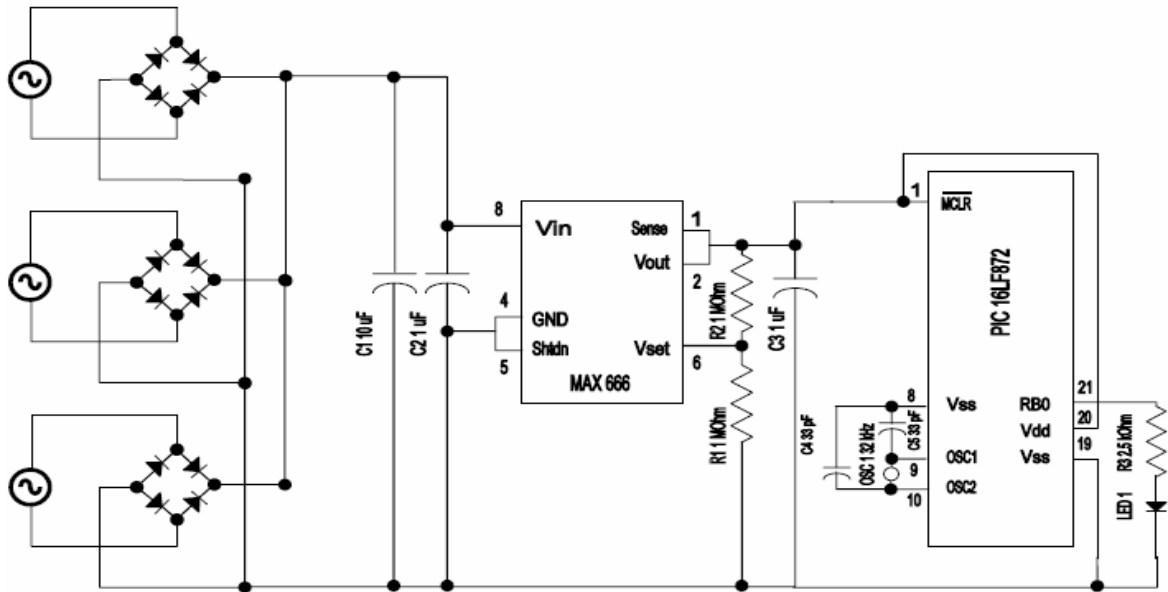


Fig. 127. Circuito eléctrico del implante.

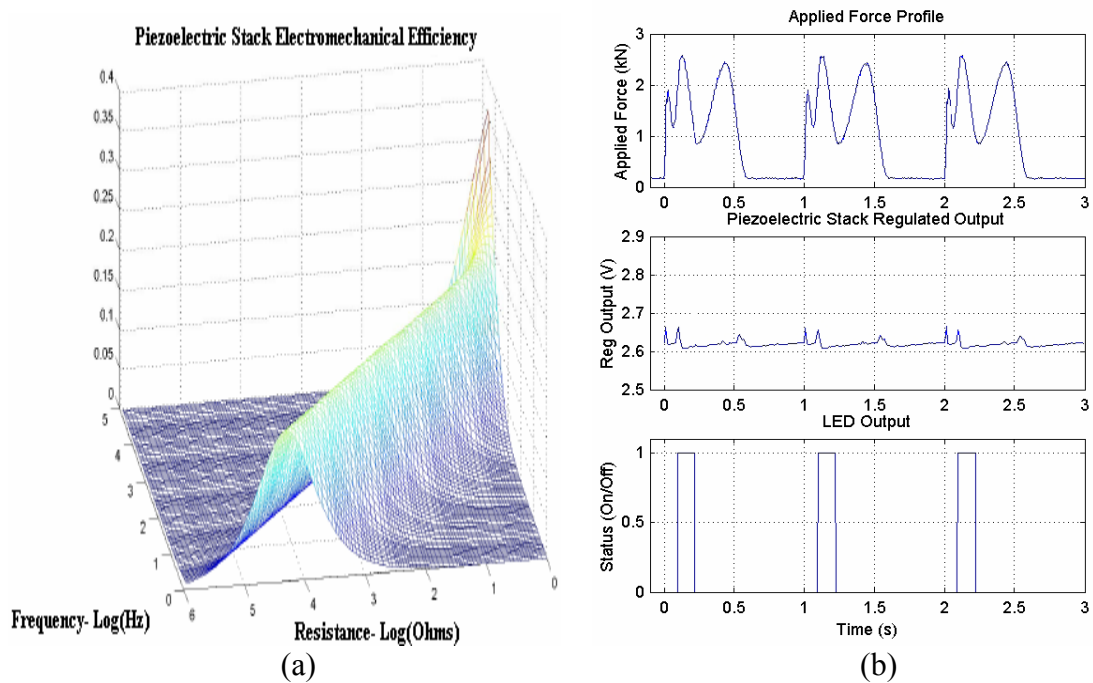


Fig. 128. (a) Gráfico de la eficiencia electromecánica del piezoeléctrico frente a distintos valores de resistencia de carga y frecuencia; (b) Resultados de fuerza aplicada, tensión regulada en la salida y los períodos de encendido y apagado del diodo led respecto al tiempo.

## Sistemas piezoeléctricos.

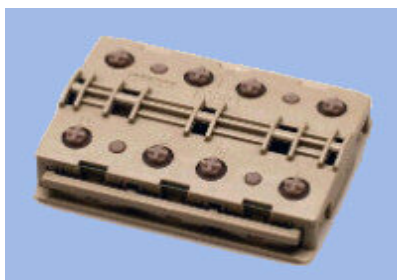
### Generación en animales.

De igual forma que los sistemas magnéticos y electrostáticos, los elementos piezoeléctricos pueden ir montados sobre animales para producir energía a partir de sus movimientos. Una chapa, con un extremo sujeto a la base del conjunto y en el otro extremo una masa que aumente la inercia de la chapa con los movimientos exteriores sería capaz de deformar un piezoeléctrico montado sobre ella. De esta forma se alimentarían dispositivos sensores para medir ciertas variables del animal (comportamiento, temperatura, etc) o simplemente para tenerle controlado (señales de identificación RF).

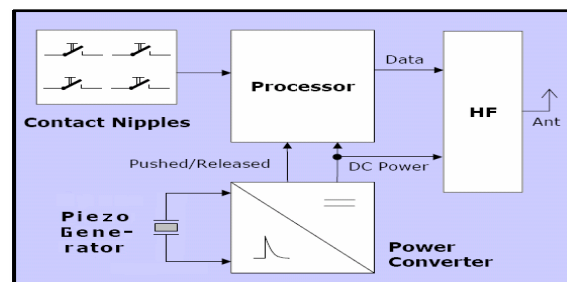
Siguiendo con el ejemplo de generación en un zapato, se podrían incluir elementos piezoeléctricos en las herraduras de los caballos (previamente acondicionadas) o de otros animales para aplicaciones como las anteriores. En el caso de caballos de carreras se podría implementar un sistema para medir sus características en competición (pulso cardíaco, capacidad pulmonar, etc) o un sistema para detectar el orden de llegada en las carreras.

### Generación al pulsar un botón.

**Transmisor PTM 100:** uno de los sistemas de la empresa alemana EnOcean es el transmisor de información PTM 100. Este sistema funciona de forma parecida a otros modelos presentados anteriormente, pero en este caso incluye un elemento piezoeléctrico para dotar de energía al sistema. Este sistema es capaz de proveer un máximo de 10 mW de potencia [43]. Esto es así cuando se pulsa uno de sus botones (en la figura 129 (a), el botón alargado de la parte inferior) y posteriormente se libera para volver a su posición, tras lo cual se envía un código a un receptor con el dato del tiempo desde que se pulsó hasta que se liberó. El sistema tiene además otros contactos para controlar, por ejemplo, el encendido y apagado de luces, detector de apertura de puertas, usos industriales en fabricación (paradas y puestas en funcionamiento de máquinas), etc. Después de pulsar el botón de generación se pueden pulsar uno o varios de sus botones. El transmisor enviará un código de 32 bits con el número de botones pulsados, además del estatus del botón generador (presionado/liberado).



(a)



(b)

Fig. 129. (a) Transmisor PTM100, alimentado con elementos piezoeléctricos; (b) Esquema en bloques del sistema.

**Sistema del MIT:** en el año 2001 se desarrolló en el MIT un dispositivo de transmisión autoalimentado a través del esfuerzo aplicado a un piezoeléctrico mediante la pulsación de un botón. Con una fuerza en la pulsación de 15 N se consiguió entre 0,5 y 1 mJ a 3 V, suficiente para sustentar un encoder digital y un emisor de radio [9] [12]. Se transmitió un código de identificación de 12 bits a un receptor situado a 50 pies de distancia (unos 15 metros).

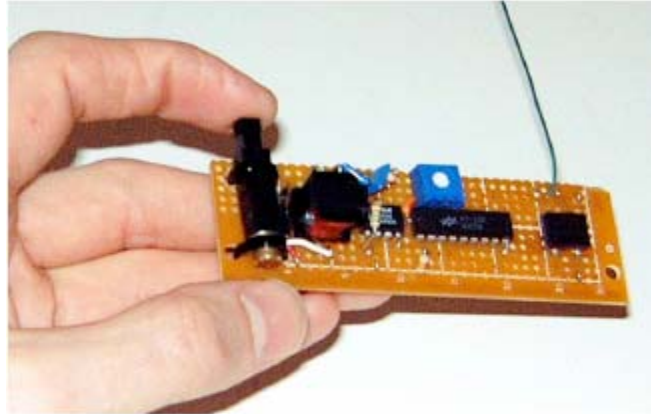


Fig. 130. Sistema transmisor del MIT.

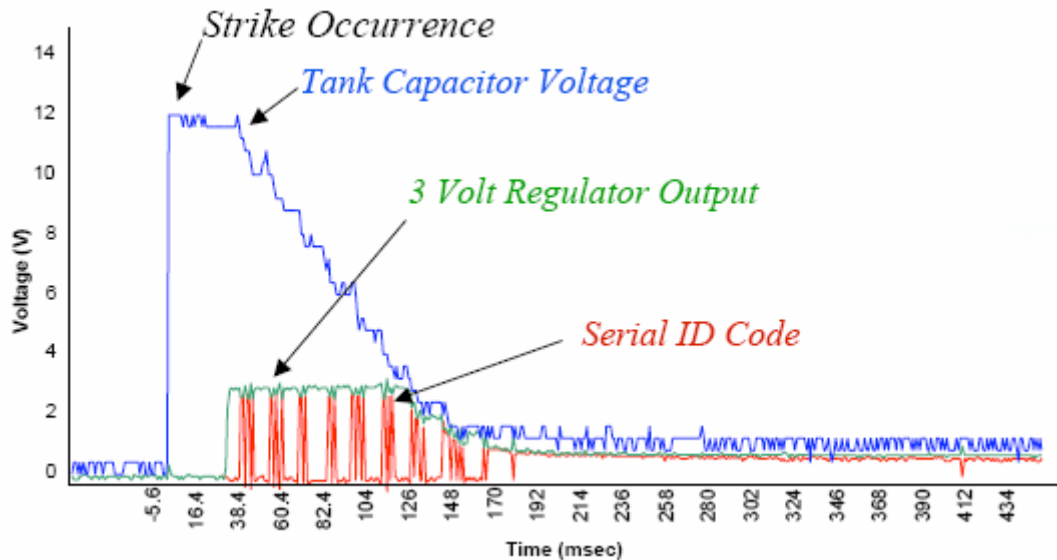


Fig. 131. Gráfico de tensión-tiempo desde la pulsación hasta el final de la transmisión.

## **Sistemas piezoeléctricos.**

---

### **Encendedor de gas.**

Una aplicación típica de un piezoeléctrico es la de utilizar su carga para producir una chispa y prender el gas. Se puede tener un depósito de combustible para producir la llama, aunque no es necesario.

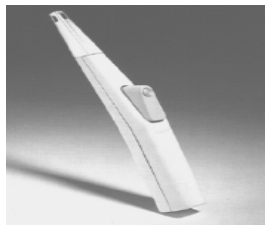


Fig. 132. Encendedor piezoeléctrico para cocinas de gas.

### **Generación mediante vibración producida por partículas radiactivas.**

Investigadores de la Universidad de Cornell en Estados Unidos han conseguido generar electricidad con las vibraciones producidas por elementos radiactivos mediante su emisión de partículas. Básicamente, el sistema genera energía con las vibraciones del medio en el que se encuentre, pero en ausencia de éstas se aprovechan las vibraciones producidas por las partículas que emite un radioisótopo. El elemento radiactivo queda posicionado en la parte inferior (elemento amarillo de la figura 133), enfrentado a una fina capa de cobre colocada en el extremo inferior de la placa. Cuando el radioisótopo libera partículas  $\beta$  (electrones de alta energía), carga negativamente el cobre, quedando el radioisótopo cargado positivamente. Esto produce una atracción entre ambas partes, produciendo una deformación en la placa y consecuentemente en el elemento piezoeléctrico, generándose así energía. Cuando el radioisótopo y el cobre se tocan físicamente, los electrones del cobre pasan al radioisótopo. Al quedar el cobre sin carga, se pierde la atracción entre ambos componentes, lo que produce una nueva deformación en el piezoeléctrico mientras la placa vuelve a su estado inicial.

Debido al miedo que producen en la sociedad los materiales radioactivos hay que decir que se utiliza una fina capa (10 micrones de ancho) de  $16 \text{ mm}^2$  del radioisótopo  $^{63}\text{Ni}$ , con una muy baja generación de partículas  $\beta$ . Dichas partículas tienen una capacidad de penetración en la mayoría de los sólidos de solo 20 micrones. Tienen por tanto una relación muy baja entre la energía generada y el número de cargas que emiten. Esto hace que las partículas  $\beta$  del radioisótopo anterior no sean capaces de traspasar la misma piel muerta que recubre nuestro cuerpo. Además, este material no es tan altamente tóxico como otros radioisótopos. Los rayos gamma tienen por ejemplo dificultades para ser confinados. Las capas finas de material no pueden absorberlo, por lo que es inviable la utilización de elementos que emitan dicha radiación.

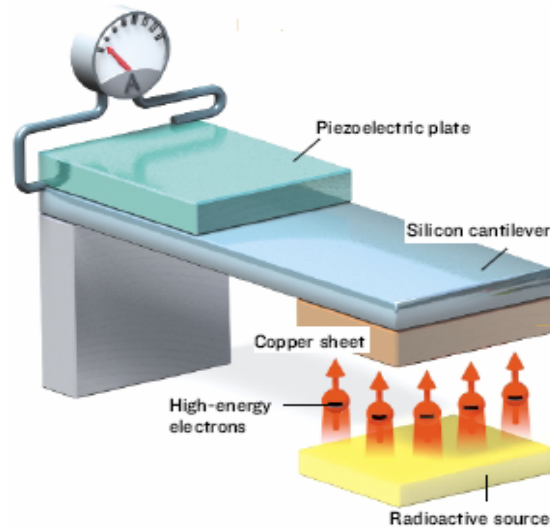


Fig. 133. Dibujo del sistema.

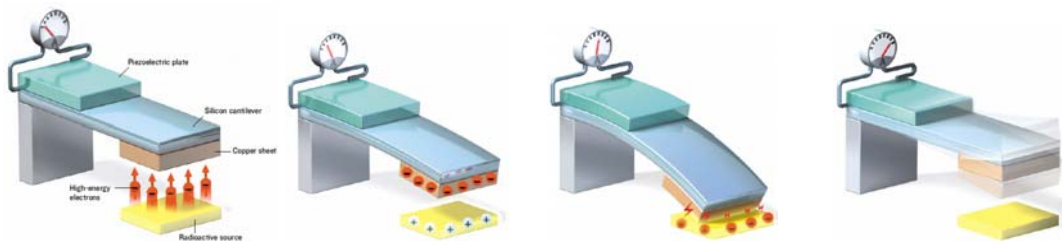


Fig. 134. Proceso de obtención de energía.

Se ha llegado a tener de 100 a 1000 veces más densidad de energía que los microgeneradores de conversión química para una escala de volumen mucho menor. Del prototipo se obtuvo unos niveles de densidad energética de  $5,9 \text{ J/cm}^3$  (asumiendo una salida de 100 nW para el radioisótopo  $^{63}\text{Ni}$  durante 100 años, un 2,5% de eficiencia en la conversión y unas medidas de  $2 \times 1 \times 0,5 \text{ cm}$ , lo cual es bastante mejor que los  $0,435 \text{ J/cm}^3$  de la batería de ión- litio de Panasonic (modelo CGR1850A), asumiendo una capacidad de 2000 mAh y unas medidas de 1,8 cm de diámetro y 6,5 cm de alto [42].

Podemos utilizar directamente la señal DC rectificada o bien almacenar la energía en un condensador o una batería recargable. Los creadores desarrollaron un oscilador de luz autoalimentado, formado por un procesador que detecta las variaciones de luz de un fotodiodo. En la figura 135 se pueden ver los resultados de la salida del piezoeléctrico. Tras rectificar la salida se obtuvieron aproximadamente 2 voltios, capaces de alimentar electrónica de bajo consumo. La frecuencia de oscilación es de 35 Hz y se obtiene un pico de potencia a la salida de  $30 \mu\text{W}$  con una conversión del 1% [42].

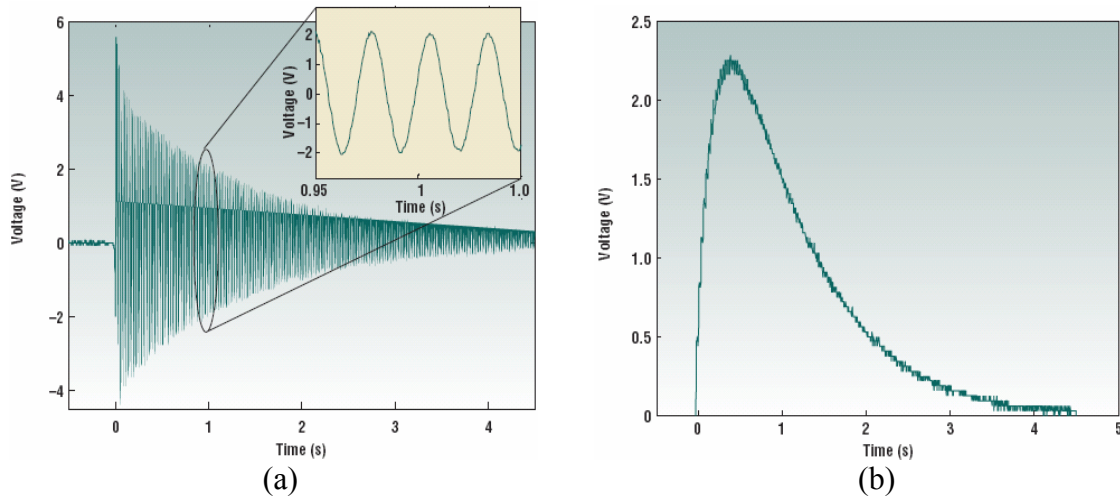


Fig. 135. (a) Gráfico de tensión a la salida del piezoeléctrico; (b) Tensión rectificada medida en un condensador externo de 470 nF.

El sistema esta formado por un elemento piezoeléctrico, un rectificador en puente completo, un condensador que almacena la energía generada, un fotodiodo y un oscilador en anillo. Siendo el condensador utilizado de 470 nF, su tiempo de descarga es de unos 3 segundos aproximadamente (figura 135 (b)). El fotodiodo es iluminado con un láser externo a una potencia de 500 nW a 780 nm. Para estas condiciones, la corriente de salida del diodo es de 250 nA. Al iluminar el fotodiodo con una señal modulada en ancho de pulso, obtenemos a la salida del oscilador una señal cuadrada y modulada en ancho de pulso. Este ancho variará en función de la intensidad con la que iluminemos el fotodiodo.

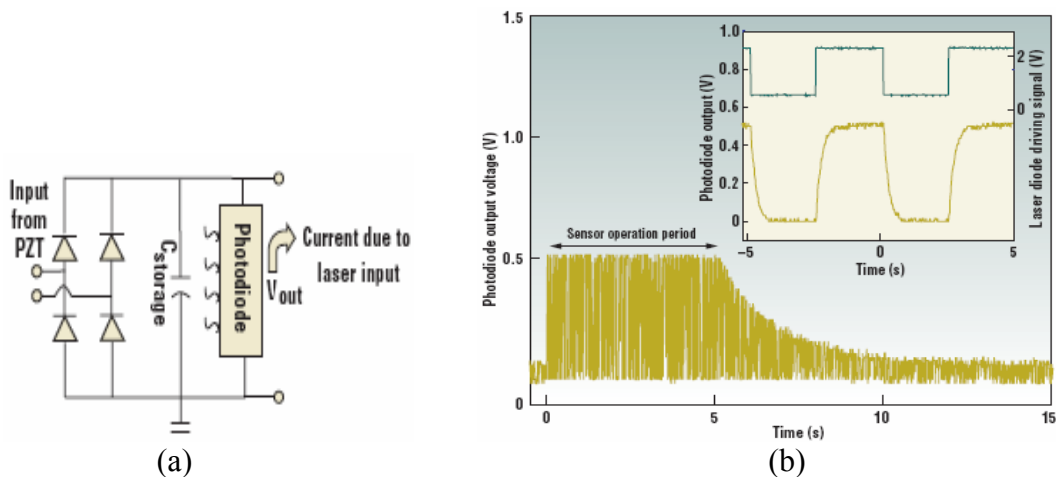


Fig. 136. (a) Sistema generador con fotodiodo; (b) Salida de tensión en la salida del fotodiodo.

El gráfico de la figura 137 (b) se tomó 200 milisegundos después de la descarga, lo cual implica que disponemos de una señal a la salida del fotodiodo de 1,4 V y 250 nA. El oscilador que ponemos a la salida del fotodiodo oscila a 1,58 kHz con las condiciones anteriores, y consume no más de 0,7 V y 1 nW al estar formado por una plataforma de transistores de tecnología CMOS con control de consumo de energía. Este experimento implica la posibilidad de incluir elementos piezoeléctricos en aplicaciones ópticas y de sensado.

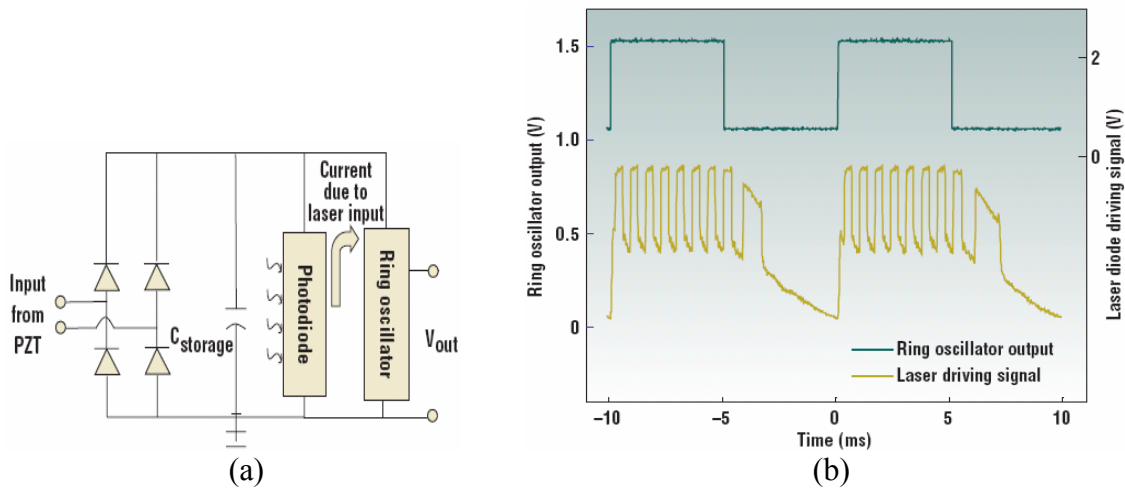


Fig. 137. (a) Esquema eléctrico completo del sensor óptico autoalimentado; (b) Gráfico de tensión en la salida del oscilador controlado por un fotodiodo.

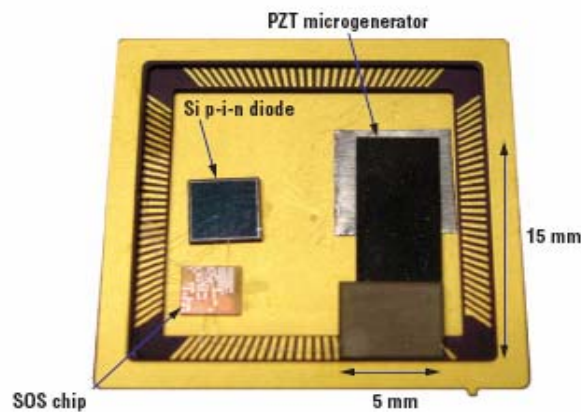


Fig. 138. Sistema final miniaturizado.

### Generación debida al crecimiento de burbujas.

La Universidad de Seúl y el Instituto de Ciencia y Tecnología de Corea del Sur han desarrollado un sistema miniaturizado basado en elementos piezoeléctricos, que genera a partir del movimiento producido por el crecimiento de una burbuja. El número de piezoeléctricos puede variar, por lo que no se detallan resultados de energía recavada (deflexión máxima de 0,7 mm) [35]. Como es lógico, su aplicación en sistemas hace que se necesite una fuente de calor que produzca burbujas.

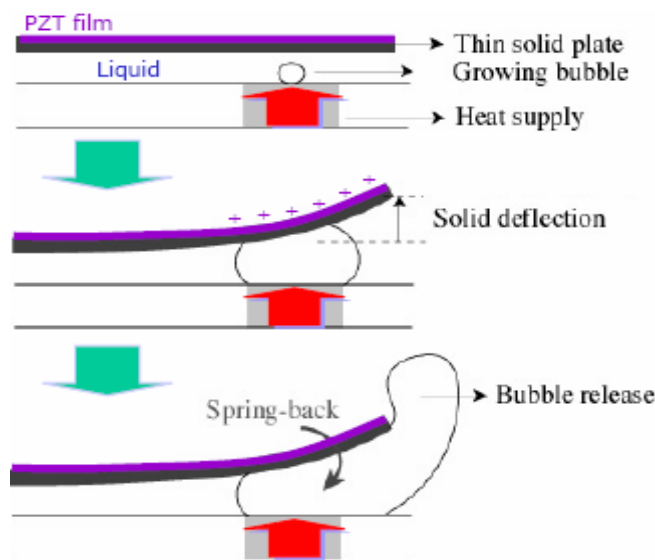


Fig. 139. Movimiento de un piezoeléctrico producido por una burbuja.

### Generación a partir de vibraciones de un sistema móvil.

**Sistema n°1:** uno de estos proyectos es el presentado por el departamento de Electrónica y Ciencia de la Computación de la Universidad de Southampton en el Reino Unido. Este modelo, realizado en tecnología MEMS, es muy parecido al montaje del sistema que utiliza un radioisótopo, aprovechando en este caso las vibraciones de un elemento móvil para mover el piezoeléctrico, que va montado en una chapa que se hace pender. Para aumentar la inercia de la chapa se coloca una masa en su extremo.



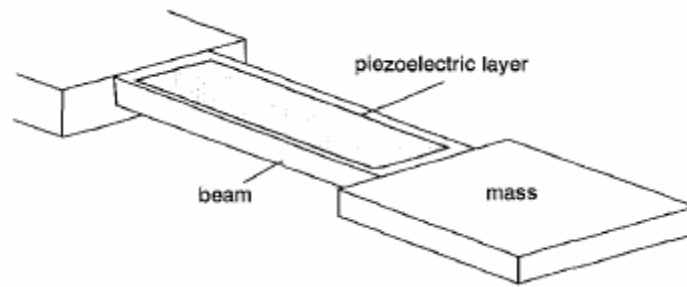


Fig. 140. Dibujo del prototipo de la Universidad de Southampton.

Para determinar la frecuencia de resonancia se utilizó un analizador de señal, que escaneaba las distintas frecuencias que producía el sistema, movido por un vibrómetro. Se midió que el sistema resonaba a 80,1 Hz, con una amplitud de la chapa de 0,8 mm. Al conectar cargas de distinto valor en la salida se comprobó como a mayor amplitud de la chapa aumentaba la tensión y la potencia. Según la figura 141(b), la resistencia óptima conseguida fue de 333 k $\Omega$ , para la cual no variaba la potencia de salida con respecto a la amplitud de vibración.

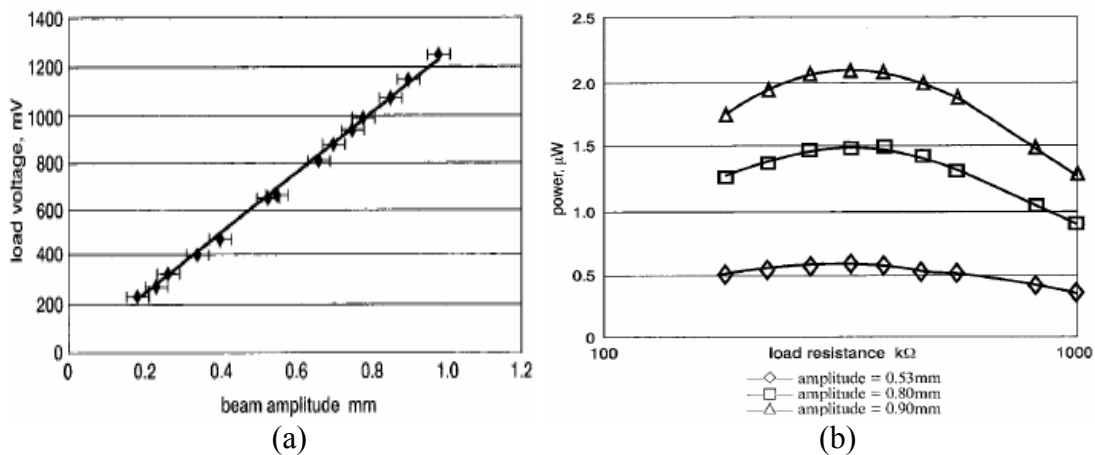


Fig. 141. (a) Gráfico de tensión en carga – amplitud de la placa; (b) Gráfico de potencia de salida- resistencia de carga para distintas amplitudes de la placa.

Este sistema piezoeléctrico miniaturizado (la longitud del PZT es de 10 mm) no fue capaz de dar más de 3  $\mu$ W [32], insuficiente para alimentar un chip. En este caso se puede disponer el sistema de forma que el piezoeléctrico genere más al producirse esfuerzos simultáneos.

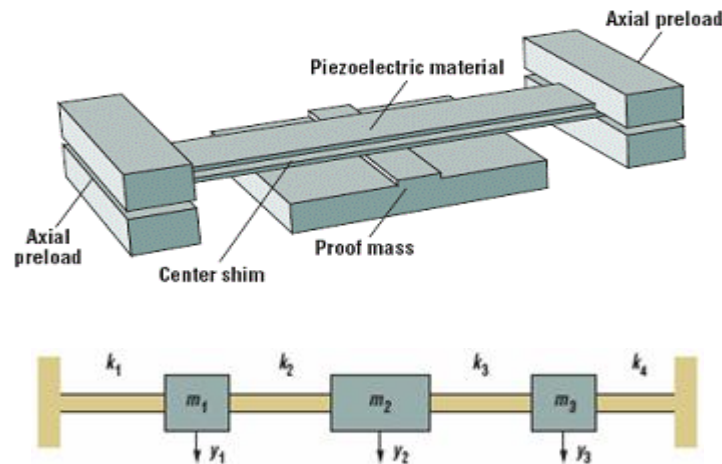


Fig. 142. Configuraciones con varias masas para una mayor generación.

**Sistema n°2:** en este sistema de la Universidad de Nevada (Estados Unidos) se diseñó un dispositivo con el fin de aplicarlo en sensores wireless. Para ello se utilizó una pila de 10 piezoeléctricos de  $8,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$ , que se comparó con otra de también 10 piezoeléctricos, pero con un área de  $2,8 \times 1,4 \text{ cm}^2$ . Para una misma presión ejercida de 100 MPa, la energía generada por la primera pila fue de 540 mJ y para la segunda fue de 100 mJ [36].

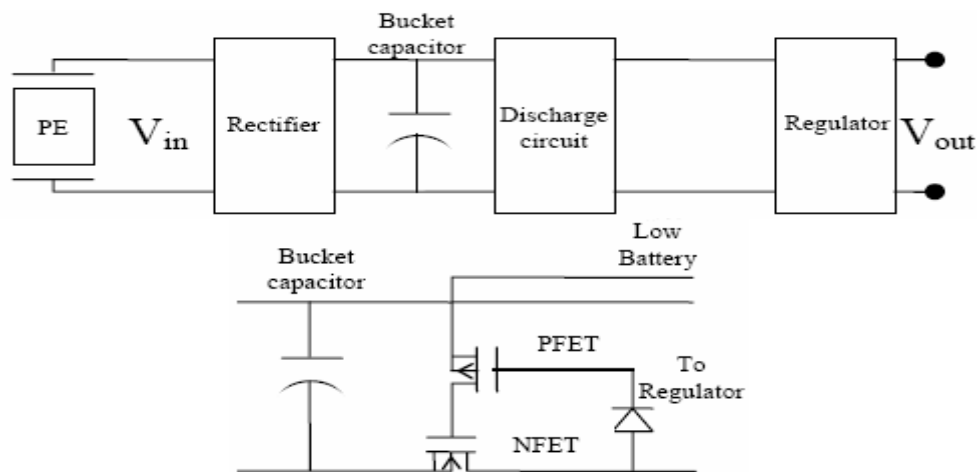


Fig. 143. Diagrama de bloques del sistema y esquemático del circuito de descarga.

La salida del piezoeléctrico es rectificada y almacenada en un condensador. Cuando éste se carga a un cierto valor predeterminado de tensión se hace descargar en el regulador. Esto se consigue de una forma similar a la del proyecto del zapato, siendo un

zener el control para el encendido del FET canal N. Para el apagado de este transistor una vez decae la salida un cierto nivel, el regulador elegido (figura 144) dispone de un sistema de detección de batería baja igual al del regulador MAX666 del proyecto del zapato. Mientras la entrada LBI esta a un nivel mayor que la referencia interna (1,23 V), LBO (salida de drenador abierto) se mantiene en alta impedancia. Al caer LBI por debajo de los 1,23 V activa el MOSFET canal N y pone a tierra LBO, parando la descarga del condensador.

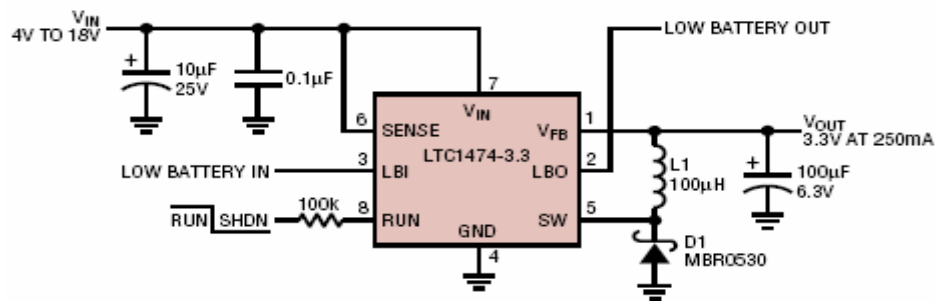


Fig. 144. Regulador LTC1474 de Linear Technology.

Este regulador permite una salida regulada de 3,3 o 5 V y un máximo de 250 mA a partir de un rango de 3 a 18 V de entrada. Se sustenta a su vez con corrientes del orden de 10  $\mu$ A [36].

**Sistema n°3:** en otro proyecto similar se utilizaron dos piezoeléctricos de medidas 4,6 cm x 3,32 cm x 0,025 cm.

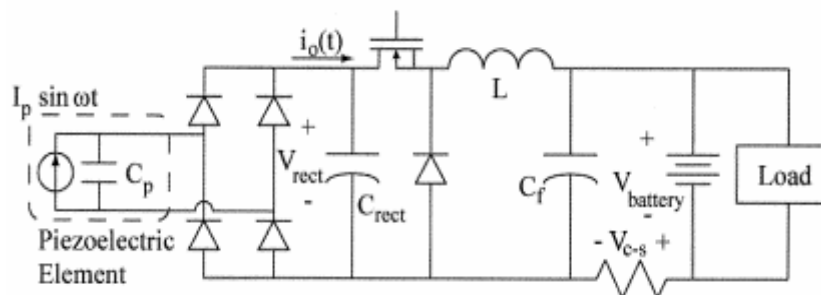


Fig. 145. Esquema eléctrico del conjunto.

La potencia máxima obtenida fue de 30,66 mW para un ciclo de trabajo óptimo del 2,81% y una frecuencia de 1 kHz [37]. En la figura 146(b) se puede ver la salida de potencia utilizando directamente una resistencia a la salida del rectificador, otra salida utilizando el convertidor reductor y otra utilizando una batería a la salida del rectificador.

La diferencia entre ellas se debe básicamente a las pérdidas en los diferentes componentes (bobina del reductor, caída en los diodos de rectificación y del reductor, etc). Las pérdidas en conducción son mayores trabajando en modo de conducción continuo.

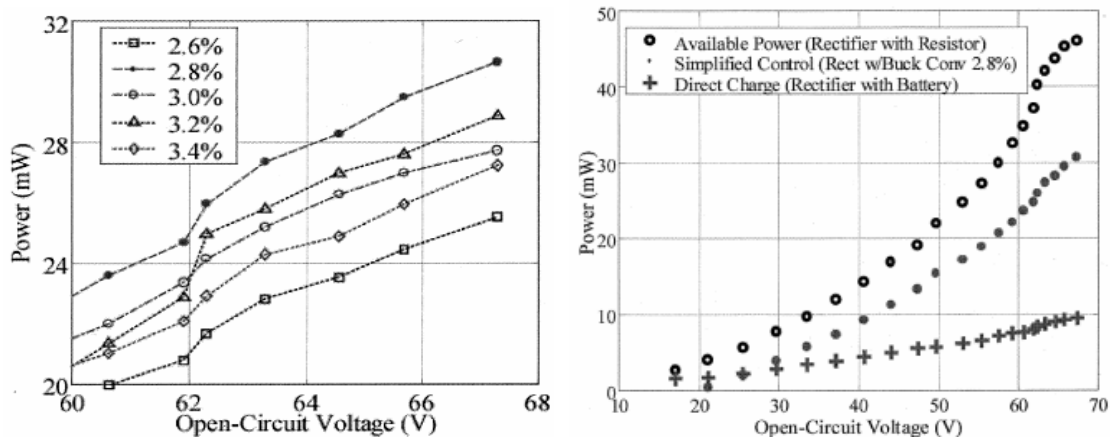


Fig. 146. (a) Gráfico potencia de salida - tensión en circuito abierto para diferentes ciclos de trabajo; (b) Gráfico de potencia – tensión en circuito abierto a diferentes configuraciones.

Los dos sistemas anteriores pueden incluirse en motores, lavadoras, ruedas de coches o juguetes para tomar medidas de datos (temperatura, tiempo de funcionamiento, número de vueltas, etc), y envío de éstos por radiofrecuencia, control de encendido y apagado de dispositivos, hacer sonar melodías o encender luces, entre otras posibilidades.

Otra posibilidad es la de incluirlo como fuente de alimentación de un sensor para el nivel de líquido de un depósito en sistemas de aire acondicionado. Estos sistemas constan generalmente de dos aparatos, uno interno y otro externo a la vivienda. Al funcionar, eliminan parte del agua que hay en su circuito encargada de absorber el calor del refrigerante como resultado de su operación para enfriar el aire interno. Esta cantidad de agua desechada se evacua posteriormente mediante un tubo directo al exterior. En el caso de encontrarse el aparato exterior dentro del recinto de la casa, caso de una terraza o un porche, necesitaríamos un depósito para almacenar el agua. Este depósito debería ser vigilado periódicamente o añadir un sensor de nivel para evitar el sobrellenado, ya que cuando el circuito del sistema se llena de agua, ésta sale por la salida de aire del aparato interno de la casa, empapando las paredes y todo lo que esté a su alrededor.

El elemento piezoeléctrico montado sobre la base metálica del aparato exterior produciría energía a partir del movimiento de vibración provocado por el ventilador que lleva dentro para evacuar el aire caliente. En caso de superarse el nivel deseado se enviaría una señal a un receptor en el aparato interior para apagarlo.

**Sistema n°4:** en este proyecto del departamento de Ingeniería Mecánica del MIT tenemos un generador de película delgada de material PZT ( $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ ), especialmente diseñado para resonar a frecuencias ambientales. En el experimento se demuestra que a la primera frecuencia de resonancia (13,9 kHz), la carga generada es proporcional al desplazamiento de la ménsula. El sistema, con unas medidas de  $170\text{ }\mu\text{m} \times 260\text{ }\mu\text{m}$ , fue capaz de desarrollar un máximo de  $1\text{ }\mu\text{W}$ , con una tensión de 2,4 Vdc sobre una carga de  $5,2\text{ M}\Omega$ . La densidad de potencia obtenida fue de  $0,74\text{ mW-h}/\text{cm}^2$ , más alta que la de una batería de ión-litio [38]. Este modelo tiene tres modos de resonancia: dos al doblarse el piezoeléctrico de arriba a abajo (a 13,9 y 48,5 kHz) y uno de torsión (21,9 kHz), obteniéndose una tensión máxima de 3 Vdc con una carga de  $10,1\text{ M}\Omega$ .

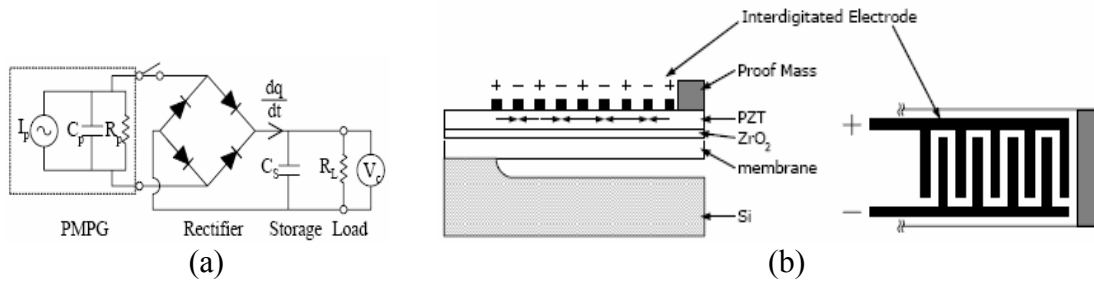


Fig. 147. (a) Equivalente eléctrico del sistema; (b) Dibujo del piezoeléctrico.

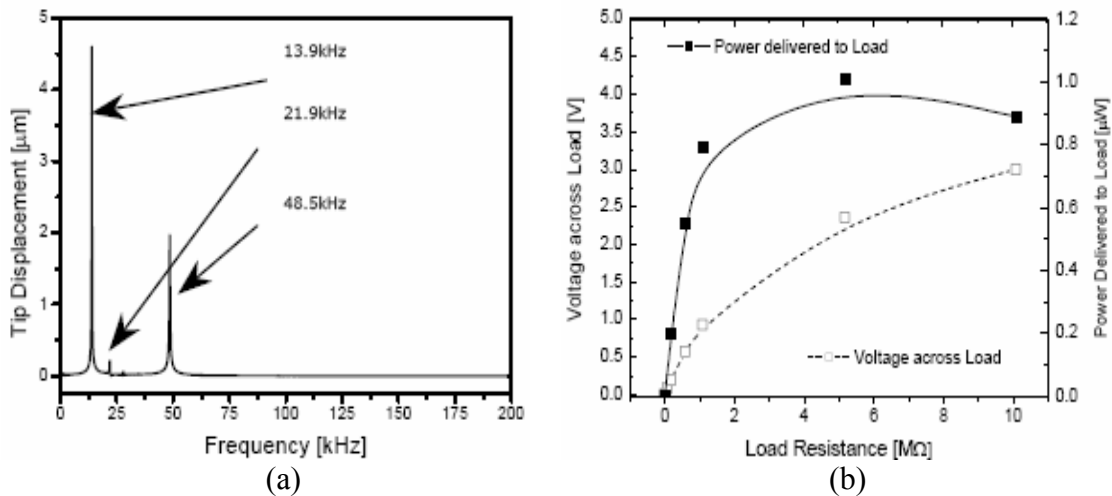


Fig. 148. (a) Gráfico de desplazamiento - frecuencia; (b) Gráfico de tensión en la carga - potencia desarrollada - valores de carga.

### **2.4.6.4 Conclusiones.**

Los elementos piezoeléctricos son quizá los más utilizados en el desarrollo actual de los microgeneradores vibracionales, debido sobre todo a que el aprovechamiento de esfuerzos va ligado directamente con su forma de obtener energía, esto es, mediante la deformación del material. Algunas de sus ventajas son [6]:

- El gran número de aplicaciones donde se pueden aprovechar sus características.
- Son relativamente fáciles de integrar.
- No necesitan, al contrario que los electrostáticos, fuente de alimentación inicial.
- Proporcionan altas tensiones de salida en circuito abierto.

Este tipo de sistemas tienen a su vez ciertas desventajas. Todos los microgeneradores vibracionales son altamente dependientes de su geometría a la hora de optimizar los valores de salida a obtener. En este caso se depende fuertemente de las medidas del material piezoeléctrico. Es por ello que en algunos casos se usan varias capas de material piezoeléctrico conectadas en paralelo formando un único elemento, en vez de solo dos capas como es lo habitual. Además tienen eficiencias muy pequeñas, debido a la limitación en frecuencia a la que están sometidos y a sus propias características intrínsecas, que pueden variar en el tiempo por envejecimiento del material, altas temperaturas, sobreesfuerzos, etc. Esto hace que estos materiales pierdan su polarización inicial.

Se considera que se obtienen del orden de pocos  $\mu\text{W}$  con el movimiento del cuerpo humano (frecuencias del orden de decenas de Hz), y hasta centenas de  $\mu\text{W}$  con su implementación en sistemas que vibren a frecuencias de hasta unos pocos kHz [34], con una densidad de energía de unos  $20 \text{ mJ/cm}^3$ , todo ello en función de su geometría, composición y el entorno en el que se aplique. Estos sistemas obtienen tensiones en circuito abierto generalmente altas, en algunos casos de centenas de voltios, y corrientes de salida muy débiles.

A pesar de sus más que evidentes desventajas, son un tipo de sistemas con gran futuro para pequeños dispositivos electrónicos como se ha podido comprobar en la sección de aplicaciones. Dicho esto hay que remarcar también que la continua investigación en este campo hará mejorar sus características y también su precio, el cual es actualmente bastante elevado y los fabricantes escasos.

## **2.5 COMPARATIVA DE SISTEMAS.**

En este apartado se exponen las características más importantes de cada uno de los microgeneradores estudiados, así como los campos de aplicación más importantes de cada uno. Las densidades de potencia son una estimación de la capacidad máxima de cada uno de ellos, pudiendo ser mayor o menor en función de la tecnología del fabricante y modo de utilización [9].

<b>Tipo de sistema</b>	<b>Densidad de potencia media estimada</b>
Fotovoltaico	Luz solar intensa: $10 - 100 \text{ mW/cm}^2$ ; Interior de una oficina: $10 - 100 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$
Termoeléctrico	$15 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ ( $10^\circ\text{C}$ de gradiente)
Electromagnético	$< 1 \text{ mW/cm}^3$ (de 100 a 500 Hz)
Electrostático	$50 - 100 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ (resonando a varios kHz)
Químico	Metanol: $20 \text{ mW/cm}^2$ Hidrógeno: $170 \text{ mW/cm}^2$
Piezoelectrico	Centenas de $\mu\text{W/cm}^3$ (a nivel de kHz) Pocos $\mu\text{W/cm}^3$ (a nivel de Hz $\rightarrow$ cuerpo humano)

Tabla 12. Densidades de potencia estimada para cada tipo de microgenerador.

**Comparativa de sistemas.**

<b>Tipo de sistema</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>	<b>Mejora en Microsistemas</b>
FOTOVOLTAICO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No tiene partes móviles.</li> <li>- Fiabilidad y niveles de salida.</li> <li>- Durabilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran dependencia de factores externos.</li> <li>- Bajo rendimiento.</li> <li>-Baja portabilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de nuevas tecnologías de fabricación.</li> <li>- Disipación de calor.</li> <li>- Portabilidad.</li> </ul>
TERMOELÉCTRICO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posibilidad de ampliación.</li> <li>- Durabilidad.</li> <li>- No tiene partes móviles.</li> <li>- Facilidad de integración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja eficiencia de conversión.</li> <li>- Baja tensión de salida.</li> <li>- Baja portabilidad.</li> <li>- Precio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Más rendimiento a bajos gradientes.</li> <li>- Mejora de materiales.</li> </ul>
ELECTROMAGNÉTICO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Potencias altas.</li> <li>- Sistemas robustos.</li> <li>-Rendimiento alto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tensión de salida muy baja.</li> <li>- Partes móviles.</li> <li>- Difícil miniaturización.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integración del imán.</li> <li>- Disposición elementos.</li> </ul>
ELECTROSTÁTICO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posibilidad de ampliación.</li> <li>- Fácil miniaturización.</li> <li>- Tensión de salida alta.</li> <li>- Posibilidad de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesita alimentación previa.</li> <li>- Limitación de tensión o carga.</li> <li>- Desgaste de materiales.</li> <li>- Necesidad de rectificación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estabilidad.</li> <li>- Disminución de la fatiga en los materiales.</li> <li>- Aumento de la energía.</li> </ul>
QUÍMICO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta densidad de potencia.</li> <li>- Estabilidad de la salida.</li> <li>- Salida en continua.</li> <li>- Reducido tamaño actual.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recarga de combustible.</li> <li>- Tecnología reciente.</li> <li>- Zonas de venta del combustible y precio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de temperatura.</li> <li>- Durabilidad.</li> <li>- Estanqueidad de los depósitos.</li> </ul>
PIEZOELÉCTRICO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tensión de salida alta.</li> <li>- Densidades de potencia altas en algunos casos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesidad de rectificación.</li> <li>- Partes móviles.</li> <li>- Precio alto.</li> <li>- Dependencia de geometría.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejora de la integración en sistemas.</li> <li>- Compuestos de mayor densidad de potencia.</li> </ul>

Tabla 13. Ventajas e inconvenientes para cada sistema.



	<b>Solar</b>	<b>Termoelectrico</b>	<b>Químico</b>	<b>Electromagnético</b>	<b>Electrostatico</b>	<b>Piezoelectrico</b>
<p><b>A P L I C A C I O N E S</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Luz trasera en bicicleta.</li> <li>- Pequeña radio.</li> <li>- Bomba de agua.</li> <li>- Lámpara de jardín.</li> <li>- Radar.</li> <li>- Semáforo.</li> <li>- Relojes y calculadora s.</li> <li>- Cargador baterías.</li> <li>- Sistemas de control industrial.</li> <li>- Red de sensores en agricultura.</li> <li>- Robots.</li> <li>- Control de subida y bajada de persianas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensores médicos.</li> <li>- Reloj de pulsera.</li> <li>- Audífonos y marcapasos.</li> <li>- Contador del tiempo de funcionamiento de un motor.</li> <li>- Contador del tiempo de uso en lámparas.</li> <li>- Cargador de baterías en implantes médicos.</li> <li>- Medidor de temperatura en una olla de cocina.</li> <li>- Sensor temperatura en proyector, motor y otros sistemas.</li> <li>- Uso conjunto con placa solar en sistema para calentar agua con energía solar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mando a distancia.</li> <li>- Electrónica de consumo (música, agenda, teléfono móvil, ordenador portátil, etc).</li> <li>- Auriculares sin cable.</li> <li>- Sensores en agricultura (medición humedad, temperatura, etc).</li> <li>- Alimentador de implantes médicos (audífonos, órganos artificiales).</li> <li>- Control de puesta en marcha y apagado de calefacción.</li> <li>- RFID tags.</li> <li>- Cepillo de dientes.</li> <li>- Cargador de baterías.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cargador de móviles.</li> <li>- Linternas.</li> <li>- Detector en semáforo.</li> <li>- Contador de vueltas en rueda de coche.</li> <li>- Timbre de una casa.</li> <li>- Mando a distancia.</li> <li>- Luces de mano de la policía.</li> <li>- Juguetes.</li> <li>- Electrónica de bicicleta estática.</li> <li>- Transmisión de datos de un motor.</li> <li>- Luz en pedales de bicicleta.</li> <li>- Sensores wireless.</li> <li>- Control industrial.</li> <li>- Control apertura de puertas y ventanas.</li> <li>- Termómetro digital.</li> <li>- Banco musculatura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Principalmente de sensado y transmisión vía radio en aplicaciones MEMS (estudio de implantes, control luces en una habitación, estudio animales, etc)</li> <li>- Pequeño despertador.</li> <li>- Aplicación en zapato para electrónica.</li> <li>- Muletas para medir fuerza.</li> <li>- Contador de tráfico rodado.</li> <li>- RFID tags.</li> <li>- Juguetes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medidor de fuerza.</li> <li>- Luz de balizamiento.</li> <li>- Estudio de implantes.</li> <li>- Control lavadora.</li> <li>- Sensor lluvia en tendedero de ropa.</li> <li>- Medidor de deformaciones a partir de vibraciones en estructuras.</li> <li>- Estudio de animales.</li> <li>- Encendido y apagado de vitrocerámica.</li> <li>- Detector de nivel en equipos de aire acondicionado.</li> <li>- Juguetes.</li> <li>- Encendedor.</li> </ul>

Tabla 14. Aplicaciones varias para cada uno de los sistemas.

## **2.6 ESTUDIO SOBRE ALIMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS MÉDICOS DE BAJO CONSUMO.**

### **2.6.1 Necesidades del sistema.**

El uso de electrónica en implantes médicos se remonta a los años cincuenta con la aparición de los primeros marcapasos. A partir de aquí, la ingeniería, la biología y la medicina se han unido para desarrollar un amplio abanico de sistemas para ser implantados en el cuerpo humano.

En la tabla 15 pueden verse algunos ejemplos de implantes y sus necesidades energéticas. Como cualquier dispositivo electrónico, la técnica avanza diariamente, mejorándose tanto las capacidades de las baterías como los consumos de los chips. Los datos dan simplemente una idea de los rangos donde se mueven los modelos comerciales actuales.

<b>Implante</b>	<b>Condición Médica/ Enfermedad</b>	<b>Potencia Requerida</b>
Marcapasos	Bradicardia (latidos muy lentos)	30 – 100 $\mu$ W
Defibrilador cardiaco	Taquicardia auricular y ventricular (latidos demasiado rápidos). Fibrilación (latidos desorganizados)	30 – 100 $\mu$ W (a ritmo del corazón) + 10 $\mu$ W (defibrilación)
Estimulador neurológico	Temblor esencial (debido p. ej a la enfermedad de Parkinson). Dolor crónico.	300 $\mu$ W – varios mW
Surtidor de medicamento	Diabetes, espasmos, dolores provocados por tratamientos contra el cáncer.	100 $\mu$ W – 2 mW
Implante coclear	Desordenes auditivos	10 mW
Implante de asistencia al ventrículo izquierdo	Fallo del corazón	4 -8 W
Corazón artificial	Fallo del corazón	10 – 20 W

Tabla 15. Aplicaciones y requerimientos de potencia para algunos implantes médicos.

### **2.6.2 Métodos de alimentación.**

Para realizar el estudio de un sistema de alimentación de estas características debemos conocer previamente su funcionamiento en el tiempo, es decir, si hay que alimentarlo continuamente como en el caso de un corazón artificial, o por el contrario funciona solo en determinados momentos, como en los chips surtidores de medicamentos.

Hemos de explorar las posibilidades de colocación del sistema de alimentación, ya que suele ser un elemento bastante voluminoso, además de ser el más crítico por su necesidad de recarga o sustitución. Según esto existen varias posibilidades de disposición de estos sistemas:

1. Baterías internas: el sistema de alimentación se incluye dentro del cuerpo con la consecuente simplicidad y ventaja para el paciente. Es la forma más simple por el hecho de integrar todo el conjunto, aunque este aspecto limite su uso a sistemas de pequeño tamaño y que no necesitan ser recargados con periodicidad. Una vez transcurrido el tiempo de vida de la pila se tiende a realizar una nueva operación para sustituirla. Generalmente estas operaciones son muy sencillas y de corta duración, aunque siempre conlleva un riesgo para el paciente. Las baterías internas se incluyen en sistemas de bajo consumo para ganar en durabilidad (sistemas que duren sin recarga a partir de cinco años) y sencillez en el transporte de los mismos. En este aspecto son las baterías de ión-litio las más utilizadas, dada su tensión de salida más alta y mayor ciclo de vida para el mismo peso, además de no tener efecto memoria.

Battery Type	Specific Energy (Wh/kg)	Energy Density (Wh/l)	Cycle Life	Nominal Cell Voltage (V)
Silver Oxide Primary	120	420	1	1.5
Alkaline Primary	150	380	1	1.5
Lithium-based Primary	300	640	1	3.6
Nickel Cadmium	30	100	1500	1.2
Nickel Metal Hydride	50	180	500	1.2
Lithium Ion	80	200	500	3.6
Thin-film Lithium	300	1000	70,000	3.6

Tabla 16. Comparación de las diferentes tecnologías de baterías.

2. Baterías externas: la alimentación va fuera del cuerpo, unido al sistema electrónico mediante unos cables que van debajo de la piel y en un determinado punto se hacen salir al exterior. Es una gran ventaja el disponer de alimentación externa, que siempre asegura más fácilmente la alimentación del dispositivo. Tiene por el contrario los inconvenientes de una reducción de la movilidad del paciente y un riesgo de infección en los puntos de salida de los cables. Además se debe portar externamente las baterías allá donde vaya. La alimentación externa se suele utilizar en dispositivos con necesidades de energía altas (100mW –W).

## Estudio sobre alimentación de dispositivos médicos de bajo consumo.

También cabe plantearse el uso de células de combustible de metanol para realizar la tarea de las baterías. Su gran ventaja es que son más ligeras que éstas y no necesitan cargarse con la red eléctrica, lo cual exige un tiempo relativamente alto. Cuando se trata de sustentar dispositivos médicos se han de tener sistemas que eviten en todo lo posible dejarlos sin alimentación. En el caso de las células de combustible solo hace falta rellenar su depósito con el combustible adecuado cuando proceda. Se debe además añadir un controlador del nivel para avisarnos acústicamente cuando éste es demasiado bajo.

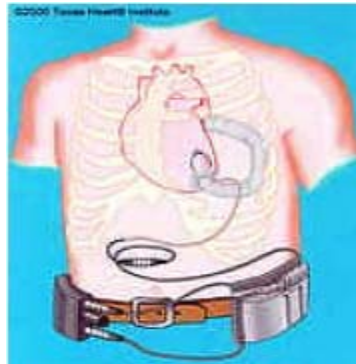


Fig. 149. Fuente de energía externa para un corazón artificial.

3. Alimentación externa sin cables: con este sistema se puede alimentar un dispositivo a partir de una batería externa o bien cargar una batería interna recargable, todo ello mediante la transmisión transcutánea de energía mediante un transformador. Hay dos bobinados: uno externo al cuerpo y otro implantado en él debajo de la piel, formando con el resto de elementos el sistema que se puede ver abajo.

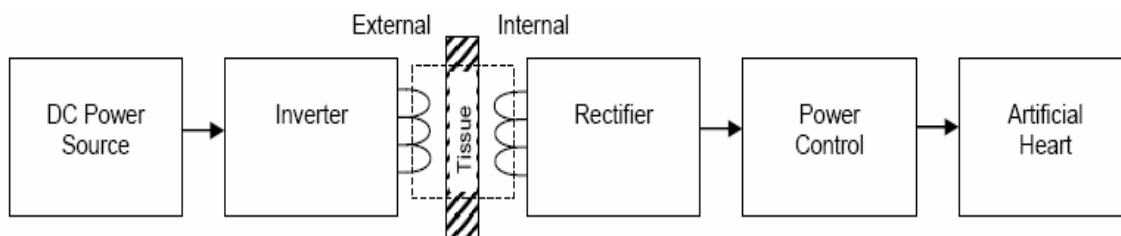


Fig.150. Diagrama de bloques del sistema con transformador transcutáneo para un corazón artificial.

Generalmente hay entre 5 y 15 mm de tejido biológico separando el primario y el secundario. La señal se rectifica en corriente continua para que la electrónica interna alimente el receptor. Es importante el hecho de, en el caso de receptores con potencias del orden del vatio, el calor generado en la transmisión y el disipado internamente. Si la

temperatura sube por encima del orden normal puede ser peligroso para el paciente. En un estudio con un corazón artificial se notificó la transmisión de 19 W, con un 82% de eficiencia en la transmisión DC-DC y una temperatura máxima en el área de implantación de 41°C [45]. Esta temperatura es considerada segura, pero no deja de ser un factor importante a tener en cuenta.

Un ejemplo de proyecto llevado a cabo con sistemas de este tipo consiste en dos rotores con imán permanente, uno fuera del cuerpo y otro dentro, que están acoplados magnéticamente entre sí. El rotor ubicado dentro del cuerpo está unido a un generador, de tal forma que al mover el rotor externo se mueve el interno de forma síncrona, generando energía eléctrica. Su velocidad será de  $n_2 = n_1(P_1/P_2)$ , siendo  $P_1$  y  $P_2$  el número de polos del rotor externo e interno respectivamente.

Se consiguió una potencia de 3,1 W y 21% de eficiencia en la transmisión para una profundidad del implante de 15 mm. Con 35 mm de profundidad se obtuvo 100 mW.

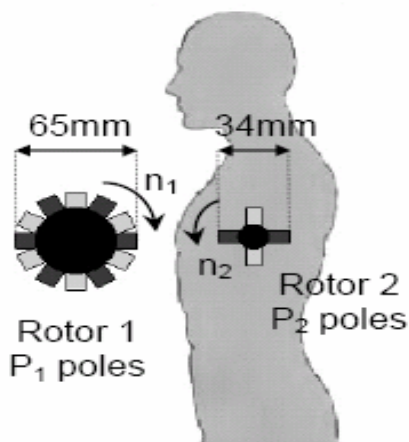


Fig. 151. Esquema del sistema de rotores acoplados magnéticamente.

El rotor externo puede ser movido de varias maneras, incluso de forma manual en caso de emergencia. Este dispositivo es una forma de cargar baterías internas sin tener que operar o utilizar cables.

Otro ejemplo es el utilizado por el corazón artificial AbioCor de la empresa Abiomed, que dispone de un dispositivo implantado en el paciente para controlar la velocidad del motor-bomba, y una batería también implantada que se carga continuamente con una consola externa o un paquete de baterías portátiles (alimentación durante no más de 4 horas) mediante electrodos de transmisión de energía transcutánea.

Un equipo de la Universidad Politécnica de Madrid diseñó y construyó convertidores continua-continua con el objetivo de alimentar un implante coclear. Se implementaron dos diseños con los siguientes resultados: una eficiencia del 75% para una separación entre devanados de 3 a 5 mm. Con una separación de 10 mm se consiguió una eficiencia máxima del 44%. El segundo prototipo cumplía con todas las restricciones de biocompatibilidad, obteniendo una eficiencia del 36% para una salida de 5 mW y una separación entre devanados de 6 mm.

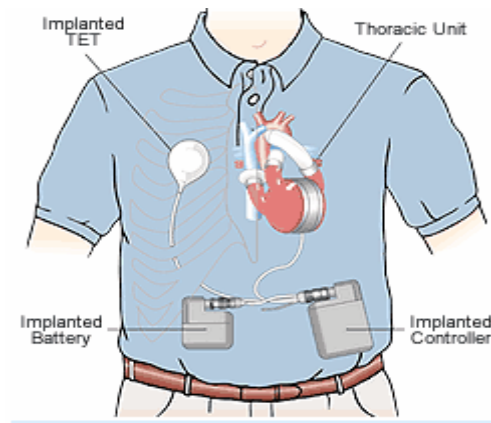


Fig. 152. Sistema AbioCor, formado por 4 partes principales implantadas.

Se comentó anteriormente el problema de la temperatura al transmitir magnéticamente la energía. Este sistema tiene además otro importante problema: su vulnerabilidad a las EMI o interferencias electromagnéticas, que provocan su mal funcionamiento. Para evitar este potencial problema se utiliza luz infrarroja. En 1999 se experimentó con la transmisión de energía mediante luz infrarroja a través de la piel de un cerdo. La luz se transformaba posteriormente en energía eléctrica mediante una célula fotovoltaica implantada en el animal. Era suficiente para sustentar el marcapasos que portaba.

En 2001 se usó una rata para otro estudio de transmisión infrarroja. Se consiguió una densidad de potencia de  $22 \text{ mW/cm}^2$  con un 20% de eficiencia en la conversión, produciendo  $1,7 \text{ mA}$  de un array de fotodiodos de  $2,1 \text{ cm}^2$ . La piel de la rata tiene una transmitancia del 64%, pero la del ser humano, con 2 mm de grosor (una gran distancia para un array de diodos) tiene solo del 10% al 20% de transmitancia. Por ello se necesita incrementar la densidad de energía o el área de detección para alimentar el mismo marcapasos. Según el estudio, un array de fotodiodos de  $20 \text{ cm}^2$  de área podría alimentar un marcapasos de dimensiones típicas  $5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 0,7 \text{ cm}$ , con un 10% de eficiencia y  $22 \text{ mW/cm}^2$ . El aumento de temperatura observado fue de  $1,4^\circ\text{C}$ , que no es considerado peligroso, aunque es importante considerar los efectos de la radiación fotónica. Para una longitud de onda de 633 nm, el límite de incidencia de un láser sobre la piel humana para no más de 10 segundos es de  $0,2 \text{ W/cm}^2$ ; a 1064 nm el límite es de  $1 \text{ W/cm}^2$ . En el experimento de la rata se usó una longitud de 810 nm, con una densidad aplicada de  $0,02 \text{ W/cm}^2$  sin producir ningún daño al tejido [45].

Otra manera de evitar la EMI es con ultrasonidos. Este método sirve tanto para transmitir potencia como para transmitir datos bidireccionalmente. Se basa en aprovechar el efecto piezoeléctrico y su reversibilidad mediante el uso de dos osciladores piezoeléctricos, uno en la superficie de la piel y otro bajo ella. Al aplicar señales AC al oscilador superficial, éste vibra produciendo ondas ultrasónicas que traspasan la piel y hacen vibrar el otro oscilador, que transforma estas vibraciones en una señal AC. Un prototipo demostró ser capaz de transmitir  $2,1 \text{ W}$  con una eficiencia del 20% en la conversión DC-DC. Además, el utilizar ultrasonidos para transmitir energía al interior del cuerpo está considerado no perjudicial para el mismo.



Para terminar con este tipo de sistemas, hay que decir que la fuente de energía externa utilizada (fuente primaria) puede ser desde una batería a cualquier dispositivo generador estudiado en este documento (termogeneradores, elementos piezoeléctricos, sistemas electromagnéticos, etc), con el fin de aprovechar continua o esporádicamente alguna de las formas de energía estudiadas.

4. Una última posibilidad en cuanto a sistemas de energía para implantes aboga por utilizar el propio organismo como fuente de energía. Como es lógico se prefieren los sistemas integrados que recaven energía del interior del cuerpo, evitando la transmisión de energía desde fuera. Como ya se introdujo anteriormente, uno de los métodos más prometedores es aprovechar el calor corporal mediante placas de efecto Seebeck. El cuerpo disipa calor como resultado de sus funciones vitales y para mantener el buen funcionamiento de las mismas. Debido a ello se producen diferenciales de temperatura de un punto a otro que se pueden aprovechar para generar electricidad. Las placas de efecto Seebeck, formadas por cientos e incluso miles de pequeñas uniones p-n, aprovechan las cualidades de los termopares para generar diferencias de potencial.

El fabricante Biophan Technologies Inc de Nueva York, utilizando avances en nanotecnología ha desarrollado placas de efecto Seebeck para explotar las pequeñas diferencias de temperatura del cuerpo humano. Estas placas tienen uniones p-n ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) de decenas de micra, generando un máximo de  $100\text{ }\mu\text{W}$  con solo una diferencia de  $1^\circ\text{C}$  entre sus superficies, siendo éstas de  $10\text{ cm}^2$  [54].

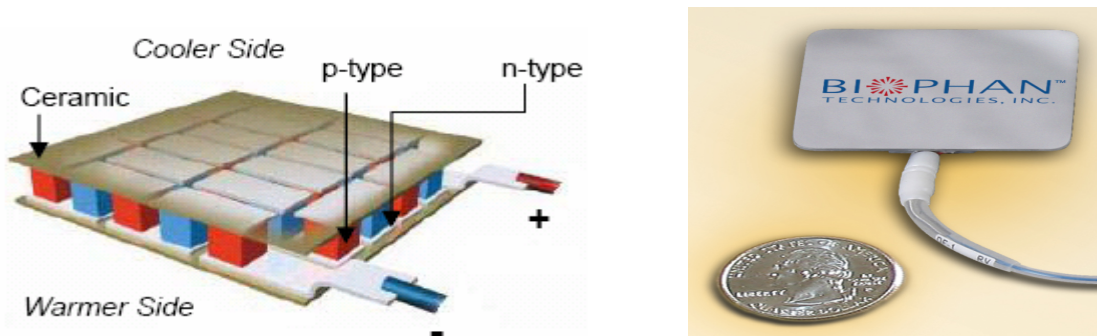


Fig. 153. Ilustración del generador térmico  $\mu$ -TEG de Biophan Technologies.

Otras formas de recavar energía del cuerpo pudiera ser mediante el aprovechamiento de su movimiento interno, del tal forma que un condensador variable, elemento piezoeléctrico y/o elemento electromagnético se encargara de transformar las vibraciones que todo organismo produce (el corazón se mueve para bombear sangre, los pulmones se dilatan y contraen para aspirar y expulsar aire, etc). Todo el sistema iría integrado dentro del paciente para recargar una batería o fuera en pequeños sistemas externos (audífonos).

Uno de estos sistemas ya estudiados es el formado por un piezoeléctrico y abastecido de vibraciones mediante el movimiento del cuerpo o mediante electrones

libres emitidos por un material radiactivo (partículas beta de muy baja energía), en el caso de no producirse un movimiento del individuo. En ambos casos tendríamos de una fuente de energía para prácticamente toda la vida. Como es lógico, se puede almacenar parte de la energía en una pila para momentos en que la generación decae, por ejemplo cuando se duerme (el movimiento se reduce, la temperatura corporal baja, etc).

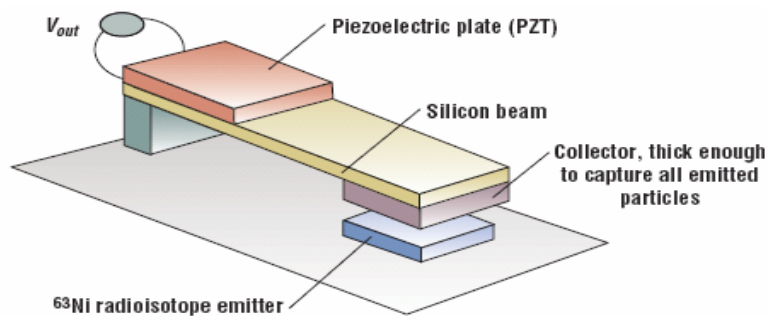


Fig. 154. Sistema de alimentación piezoeléctrico e isótopo radiactivo  $^{63}\text{Ni}$ .

Otras técnicas abogan por utilizar elementos propios del cuerpo. Esto se consigue con células de combustible que se abastecen de fluidos corporales tales como glucosa y oxígeno.

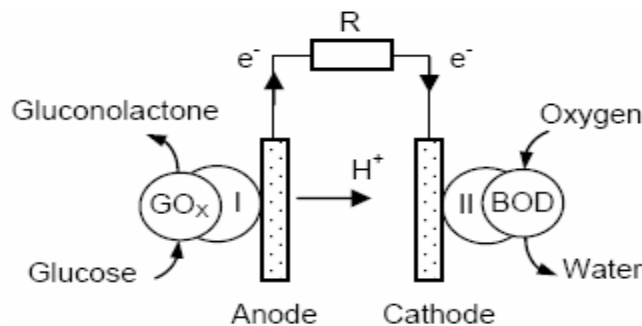


Fig. 155. Esquema de la célula de glucosa- oxígeno.

Como se ve en la figura 155, la glucosa se oxida en el ánodo, liberando electrones que circulan por el circuito externo hasta el cátodo. Aquí se combina con iones de hidrógeno y oxígeno para formar agua. Para facilitar la reacción no se utilizan materiales nobles como el platino dada su oxidación progresiva, sino enzimas. El problema es que éstas no son fácilmente accesibles a la superficie de los electrodos, por lo que necesitamos moléculas que mantengan los electrones entre las enzimas y los electrodos.

Al no utilizar materiales corrosivos no se necesita un bastidor protector, así como un separador entre ánodo y cátodo, reduciéndose el tamaño de la célula. Los prototipos fabricados han producido hasta  $4,3 \mu\text{W}$  en condiciones fisiológicas con una superficie de  $0,26 \text{ mm}^2$  [45].



## **Estudio sobre alimentación de dispositivos médicos de bajo consumo.**

Se han estudiado las regiones con cantidades suficientes de glucosa y oxígeno, siendo el interior de los vasos sanguíneos una posible localización. Sin embargo hay varios inconvenientes, como la formación de coágulos, daños en las paredes del vaso, etc. Adam Heller, de la Universidad de Texas propone su localización en el fluido intersticial subcutáneo, donde hay un flujo suficiente de glucosa y oxígeno para alimentar un sensor médico. De hecho este es el lugar donde actualmente se realiza el control del nivel de glucosa de los pacientes. El gran problema de estos dispositivos sigue siendo, además de su escasa densidad de potencia, su reducida vida útil (pocas semanas).

### **2.6.3 Conclusiones.**

En este estudio se exponen algunas de las posibilidades de aplicación práctica con fuentes de energía en implantes médicos. En un mundo ampliamente copado por el uso de baterías de distintas clases (las más utilizadas son de litio, con modificaciones según las necesidades), la aparición de sistemas que pueden complementar e incluso sustituir a éstas no hace sino aumentar el abanico de soluciones a los problemas que se presentan.

Las baterías de litio, utilizadas actualmente en marcapasos, suelen durar una media de 5 a 10 años según su utilización, ya que existen dispositivos que simplemente ayudan a las células marcapasos del corazón a realizar de forma adecuada su función (latidos lentos o bradicardia), con un consumo máximo de aproximadamente 100  $\mu$ W. Otros marcapasos suplen en su totalidad a éstas células, necesitándose decenas de milivatios para su sustentación. Para el primer caso se puede complementar e incluso llegar a sustituir la batería por alguno de los sistemas mencionados, como microgeneradores térmicos. La empresa Biophan asegura que un marcapasos con una vida de 30 años puede ser alimentado sin necesidad de batería por uno de sus sistemas. Esto asegura la funcionalidad del conjunto sin tener que recargarlo ni portar elementos externos al cuerpo, así como la no necesidad de operación quirúrgica durante este tiempo. Para el segundo caso conseguiremos aumentar el tiempo de vida de la batería, ahorrando operaciones al paciente y dinero a la sanidad pública.

Otros sistemas, como los de transmisión de energía por luz infrarroja, aseguran según algunos investigadores la completa alimentación de un marcapasos durante 100 años con solo 20 minutos de recarga diaria (mientras se duerme, se ve la televisión, etc). En el caso de un marcapasos que sustituye por completo la funcionalidad de las células del corazón, se podría alimentar con un sistema piezoeléctrico con isótopo radiactivo, a pesar de la escasa aceptación de sustancias de este tipo. Estos sistemas, según el isótopo empleado, pueden llegar a desarrollar varios milivatios con una unidad de 5 mm<sup>3</sup>, suficientes para hacerlo funcionar durante toda la vida.

La posibilidad de utilizar sistemas híbridos, es decir, una utilización conjunta de estos sistemas aporta diversas soluciones a problemas que presentan las baterías. Aún así es casi seguro que ningún sistema deje de contener en el futuro un elemento que almacene la energía interna o externamente al cuerpo, pues el desarrollo de baterías es paralelo y a la vez dependiente de estos sistemas. Algunos de ellos son externos al cuerpo, pero con baja potencia de salida y viceversa, con lo que la utilización de baterías que dispongan de la salida adecuada es indiscutible. Y esto es más palpable en sistemas

### **Estudio sobre alimentación de dispositivos médicos de bajo consumo.**

---

de potencias del orden del vatio hacia arriba. Baterías que alimenten un corazón artificial son necesarias ahora y siempre, pero los sistemas mencionados aquí pueden ayudar a reducir el número de cargas y descargas y, por tanto, aumentar su durabilidad.

El mercado de implantes médicos que utilizan microelectrónica se prevé que crezca desde los 11,9 billones de dólares en 2004 hasta 32,3 billones en 2009 [45]. Esto da una idea de la dependencia cada vez mayor de la tecnología e industrias electrónicas por parte de la medicina para lograr una mejora en la calidad de vida de los pacientes.

### **3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MICROGENERADORES.**

En esta sección se presenta un estudio de la capacidad de un microgenerador piezoeléctrico para una aplicación tan sencilla como alimentar un diodo LED de forma discontinua. Según esto la carga se almacena en un condensador hasta que se disponga de energía suficiente para hacer lucir el LED. La cantidad de veces que éste lucirá será en función directa de la frecuencia de las vibraciones y de su amplitud para asegurar un número mínimo de parpadeos. Se estudian también, a modo de curiosidad las capacidades de otros dos sistemas: un generador electromagnético y un pequeño módulo solar.

#### **3.1 Sistema piezoeléctrico.**

El objetivo de este estudio es básicamente explorar el funcionamiento de estos dispositivos para modelarlos en lo posible y conseguir aprovechar al máximo sus posibilidades. Como ya se dijo en el capítulo 2 del proyecto, los elementos piezoeléctricos pertenecen al grupo de sistemas inerciales, cuya fórmula de potencia mecánica disipada es igual a [14]:

$$P_{av} = \frac{m\xi_E \omega^2 \omega_n \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 Y^2}{\left[2\xi_T \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2 + \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2} \quad (38)$$

donde  $\xi_T$  es el ratio total de amortiguamiento dado por la expresión  $\xi_T = C_T / 2m\omega_n$ , donde  $C_T$  representa las pérdidas totales de energía, tanto mecánicas como eléctricas. La máxima potencia disipada por el generador se consigue cuando la frecuencia de las vibraciones externas que mueven el oscilador se iguala a la frecuencia natural de éste, simplificándose la expresión anterior de la siguiente forma:

$$P_{av} = \frac{m\xi_E Y^2 \omega^3}{4\xi_T^2} = \frac{m\xi_E A^2}{4\omega \xi_T^2} \quad (39)$$

teniendo en cuenta para la última expresión (39), que la amplitud (Y) producida en el oscilador depende directamente de la aceleración ejercida (A) en la base del sistema, de la forma  $A = \omega^2 Y$ .

De la expresión (39) se extraen tres consecuencias:

- La potencia aumenta linealmente con la masa oscilante.
- La potencia disminuye con la frecuencia a la que vibra el oscilador.
- La potencia aumenta con el cuadrado de la aceleración de las vibraciones.

Siendo  $C_T$  el ratio de amortiguamiento ( $C_T = 2m\omega_n \xi_T$ ), la expresión (39) puede

ponerse también de la siguiente manera:

$$P_{av} = \frac{m^2 \xi_E A^2}{2c_T} \quad (40)$$

Sin embargo, no es lógico dimensionar un sistema de este tipo para una única frecuencia de oscilación basándonos en la máxima potencia de salida. Por ello y para evitar problemas mecánicos se limita el desplazamiento de la masa inercial a un valor  $z_{max}$  dependiendo del tamaño del generador, su diseño y la limitación de los materiales utilizados. Tomando  $Q_T$  como el factor de calidad del generador según la fórmula:

$$Q_T = \frac{\omega_n m}{c_T} = \frac{1}{2\xi_T} \quad (41)$$

$z_{max}$  será  $Q_T$  veces más grande que la amplitud  $Y$ . Tomando por tanto en consideración  $z_{max}$ , la potencia obtenida tendrá la expresión:

$$P_{av} = \frac{m \xi_E \omega^3 Y z_{max}}{2\xi_T} = \frac{m \xi_E \omega^3 Y^2}{4\xi_T^2} \quad (42)$$

Incluyendo el amortiguamiento de las pérdidas mecánicas y eléctricas, la fórmula quedaría en el dominio eléctrico de la siguiente manera:

$$P_{avelec} = \frac{m \xi_E \omega^3 Y^2}{4(\xi_P + \xi_E)^2} \quad (43)$$

siendo máxima la potencia cuando se iguala el amortiguamiento eléctrico a las pérdidas mecánicas ( $\xi_E = \xi_P$ ), quedando la fórmula final de la siguiente manera:

$$P_{avelec} = \frac{m \omega^3 Y^2}{16\xi_P} \quad (44)$$

En los sistemas vibratoriales como el que nos ocupa, las pérdidas eléctricas se producen básicamente por la caída de tensión en la resistencia total externa que ve el piezoeléctrico, ya que la impedancia interna de éste es muy reducida. En estos sistemas existe un valor de resistencia externa para el que se igualan los coeficientes de pérdidas mecánicas y eléctricas, haciéndose máxima la potencia de salida. Este es un tema fundamental a la hora de diseñar el circuito y elegir los componentes, excepto si podemos variar el ciclo de trabajo, con lo que la potencia se hace insensible a la variación de carga a la salida. Esto último aumenta el número total de componentes y complica el diseño, lo cual disminuye la energía final de que disponemos. Utilizando convertidores conmutados podemos controlar el ciclo de trabajo, aunque puede ser mejor para estos niveles de potencia utilizar reguladores lineales por su simplicidad.

## Estudio experimental de microgeneradores.

Hay que decir que en cualquier aplicación los niveles de frecuencia y aceleración varían constantemente, por lo que no se puede diseñar un sistema para trabajar a una única frecuencia. Debido a esto hay que estudiar el rango de frecuencias más común en el lugar donde aprovechamos las vibraciones y dimensionar el sistema para trabajar dentro de este rango. Con una masa en el extremo del oscilador reducimos su frecuencia natural hasta que tome valores dentro del rango de frecuencias de vibración externa. La tabla 2 en el apartado “Estado de la técnica” de este proyecto enumera una serie de fuentes de vibración con su máximo nivel de aceleración a su frecuencia de resonancia, que dan una idea de los niveles que podemos encontrar en diferentes ámbitos. En el laboratorio se simulan las vibraciones de salida mediante un agitador (magnético, piezoeléctrico, etc) a frecuencias dentro del rango que tenemos previsto, midiendo tensiones de salida para ver a que frecuencia se obtiene el mejor resultado. Este estudio se hace con un valor de aceleración externo constante y característico de las vibraciones que aprovechamos. Se suele utilizar un nivel de aceleración máxima de  $1 \text{ m/s}^2$ , ya que las vibraciones más comunes que aprovechamos estarán por debajo de este valor.

El piezoeléctrico elegido para este estudio experimental es el modelo Q220-A4-303YB de la marca **Piezo Systems**, con unas medidas de 31,8 x 12,7 x 0,51 mm. Es de material PZT (zirconato titanato de plomo) tipo 5A4E. Viene ya preparado con sus electrodos y cables de salida. Sus características principales se pueden ver en la siguiente figura:

PERFORMANCE: QUICK-MOUNT BENDING GENERATORS (Cantilever mount)								VALUES TO BE USED AS GUIDELINES	
PART NUMBERS (QUICK-MOUNT BENDING GENERATORS)	PIEZO MATERIAL	WEIGHT (grams)	STIFFNESS (N/m)	CAPACITANCE (nF) (Parallel Operation)	RATED TIP DEFLECTION ① (mm <sub>peak</sub> )	RATED FREQUENCY ① (Hz)	OPEN CIRCUIT VOLTAGE ① At rated deflection, parallel operation (V <sub>peak</sub> )	CLOSED CIRCUIT CURRENT ① Per sinusoidal cycle, at rated deflection, parallel operation. (μA <sub>peak</sub> / Hz)	RATED OUTPUT POWER ① At rated deflection and frequency (mW <sub>rms</sub> )
Q220-A4-103YB	5A4E	0.9	$1.9 \times 10^2$	12	± .38	250	± 16.5	± 2.2	1.1
Q220-A4-203YB	5A4E	1.4	$3.8 \times 10^2$	26	± .38	250	± 16.5	± 4.4	2.3
Q220-A4-303YB	5A4E	2.3	$7.6 \times 10^2$	52	± .38	250	± 16.5	± 8.8	4.5
Q220-A4-503YB	5A4E	9.5	$2.4 \times 10^2$	260	± 1.57	45	± 18.1	± 46	4.7

Fig. 156. Características del piezoeléctrico de Piezo Systems.

Como puede observarse en la figura 156, la frecuencia que da el fabricante para obtener el nivel de tensión a circuito abierto es demasiado alta en relación a las frecuencias de vibración que pretendemos aprovechar, ya que en numerosas aplicaciones la frecuencia de resonancia se encuentra a pocos hertzios. Para reducirla se ha colocado una masa en el extremo de la base donde esta el piezoeléctrico. De esta manera se reduce la frecuencia natural de oscilación y aumentamos la deformación del elemento generador. En este proyecto se han utilizado dos masas de 48,78g y 39,09g para comparar los resultados.

El piezoeléctrico se ha montado sobre un oscilador formado por 4 chapas de aluminio pegadas, con un espesor total de 1,5 mm. Para simular las fuentes de vibración se ha dispuesto de un sencillo motor de corriente continua que produce el movimiento giratorio de una leva. Esta leva se encarga de golpear una base de aluminio sobre la que se coloca el generador con el piezoeléctrico, con lo que la aceleración que se imprime es prácticamente constante. Con una fuente de tensión se controla la velocidad del motor, y por tanto la frecuencia de las vibraciones, mientras que con un tacómetro digital se mide el número de revoluciones de la pulea, en el eje donde esta la leva, para conocer dicha frecuencia. Se han tomado medidas de la tensión pico a pico en circuito abierto del piezoeléctrico que se pueden ver en las figuras 157 y 158 en función de la frecuencia de vibración para un rango entre 5 y 60 Hz, que es donde generalmente se reparten la mayor parte de las vibraciones que nos pueden interesar. A mayores regímenes la masa suele perder su funcionalidad, habiendo desplazamientos mínimos del oscilador, y por tanto en el piezoeléctrico. Todo ello siempre y cuando el nivel de aceleración que provoca el desplazamiento del extremo sea reducido.

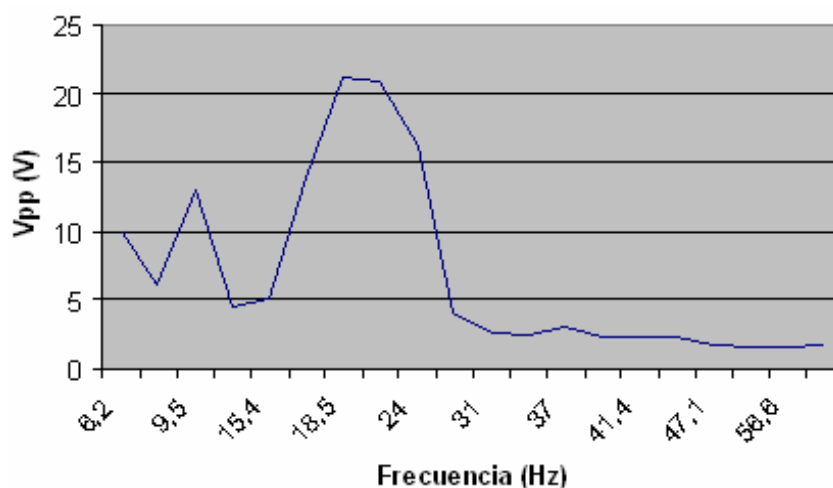


Fig. 157. Gráfica tensión pico a pico - frecuencia para la masa de 48,78g.

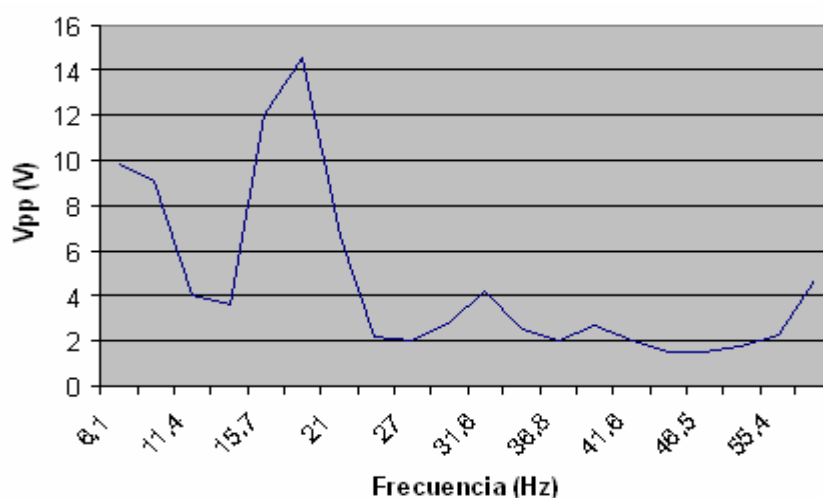


Fig. 158. Gráfica tensión pico a pico - frecuencia para una masa de 87,87 g.

En el primer ensayo se obtuvo una tensión pico a pico máxima de 21,2V a 18,45 Hz para la masa de 48,78 g en el extremo. En el segundo ensayo con la suma de las dos masas (87,87g) se consiguió un máximo de 14,7V a 16,25 Hz. Como puede verse en las figuras 157 y 158, para una aceleración constante en la base se obtienen en ambos casos mayores desplazamientos del extremo, y por tanto, mayores tensiones de salida a niveles de frecuencia muy bajos. El rango de frecuencias donde se obtiene una apreciable cantidad de energía es muy estrecho. Esto indica claramente la necesidad de optimizar la masa para el rango de frecuencias exterior. Hay que decir que al utilizar en el segundo caso una masa demasiado grande para el oscilador, la deformación que sufre el aluminio es excesiva, lo que hace que pierda rigidez. Esto produce una paulatina reducción del nivel de amplitud, lo que reduce considerablemente los niveles de tensión de salida.

En el primero de los casos (figura 157) se han obtenido niveles de tensión pico a pico mayores, obteniéndose una media de tensiones de pico de 10,6 V. Considerando el piezoeléctrico como un condensador plano-paralelo cuando trabaja a bajas frecuencias, su energía puede escribirse como:

$$E_c = 1/2 C_p V_p^2 \quad (45)$$

donde **C<sub>p</sub>** es la capacidad de la fuente de energía y **V<sub>p</sub>** es la tensión de pico obtenida. Siendo **C<sub>p</sub>** igual a 52 nF (dato del fabricante cuando trabaja en paralelo), la energía desarrollada por el piezoeléctrico es:

$$E_c = 1/2(52 \cdot 10^{-9}) \cdot 10,6^2 = 2,92 \mu J \quad (46)$$

Habiéndose obtenido este nivel a una frecuencia de 18,45 Hz, la potencia eléctrica máxima obtenida es igual a:

$$P_{elec} = 2,92 \cdot 18,45 = 53,87 \mu W \quad (47)$$

Es importante la búsqueda de un material adecuado para el oscilador, de modo que tenga la suficiente elasticidad para permitir la deformación del piezoeléctrico, y por otra parte no sea quebradizo, con una buena resistencia a fatiga. En este aspecto existen polímeros que ofrecen buenas características, aunque generalmente los metales ofrecen mejores resultados, dado su mayor resistencia a la fatiga. En otros proyectos se han estudiado materiales como el silicio, el acero inoxidable tipo 302FH y el berilio-cobre (BeCu). Este último material se compone de cobre con un porcentaje de berilio entre 0,5 y 3%. Se suele utilizar para herramientas, instrumentos de percusión, etc. Comparado con el acero es menos duro, además de desgastarse con mayor rapidez y ser más caro. El silicio es más quebradizo que los dos anteriores. En el gráfico siguiente pueden verse los niveles de frecuencia que son capaces de soportar cada uno de los distintos materiales y distintos grosores. Como se puede apreciar, el material que obtiene mejores resultados es el acero inoxidable, soportando esfuerzos a frecuencias superiores a 1 kHz para un grosor del material de 325  $\mu m$ .

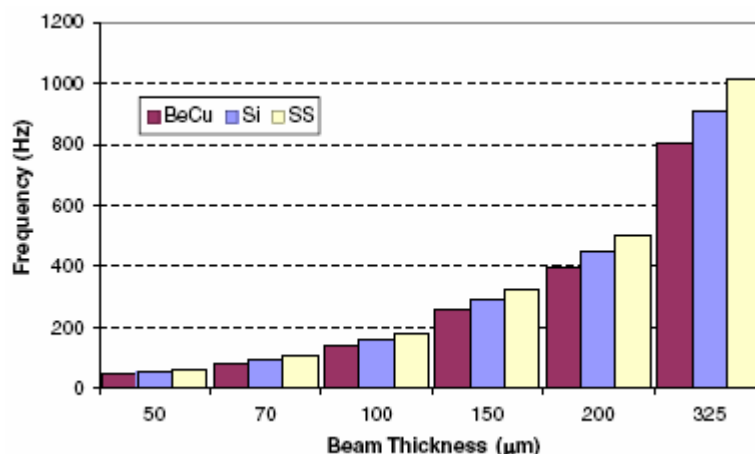


Fig. 159. Niveles de frecuencia para distintos grosores y materiales.

El circuito utilizado para todo el proceso de acondicionamiento y regulación de la señal que alimentará el LED se puede ver en la figura 160. En primera instancia, la tensión aún alterna es rectificada en un puente de diodos y enviada a un condensador electrolítico de  $1\mu\text{F}$ . Este condensador se encarga de almacenar la energía recavada por el elemento generador. El control de la descarga de este condensador se realiza mediante un diodo zéner, con una tensión zéner de  $6,8\text{V}$ . El condensador necesita llegar a unos  $7,4\text{V}$  para polarizar el transistor PNP y el diodo zéner, activando así el MOSFET que cierra el circuito. De esta forma la corriente dispone de un camino de regreso al condensador. La tensión aplicada al chip MAX666 sale regulada a  $5\text{V}$  para aplicarla directamente sobre un diodo LED.

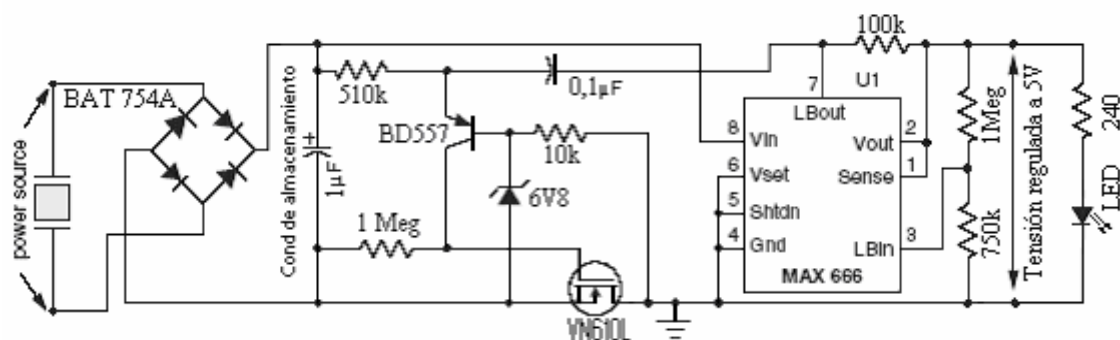


Fig. 160. Circuito acondicionador y de carga- descarga del condensador.

El chip MAX666 es un regulador lineal, y por tanto controla la tensión de salida ajustando continuamente la caída de tensión en un transistor de potencia, en este caso un NPN conectado en serie entre la entrada no regulada y la salida. Este transistor es controlado a su vez por un amplificador de error, el cual compara una referencia interna de  $1,3\text{V}$  con otra tensión proveniente de un circuito de muestreo, que toma constantemente muestras de la salida. Poniendo la patilla  $V_{\text{set}}$  a tierra, se toman muestras de la salida a partir de un divisor resistivo interno, que fija la salida a  $5\text{V}$ . Si se prefiere una salida entre  $1,3$  y  $16\text{V}$  se ha de calcular un divisor resistivo externo al chip.



## Estudio experimental de microgeneradores.

En nuestro caso hemos dispuesto el circuito para una salida regulada de 5V. La salida puede ser deshabilitada mediante un pulso en la patilla **Shutdown**, consiguiéndose un consumo de corriente máximo de 12  $\mu$ A.

El MAX666 también dispone de un comparador para realizar, si se quiere, un control sobre la corriente de salida. Para ello se ha de colocar una resistencia ( $R_c$ ) entre las patillas **Vout** y **Sense**. De esta forma se compara la tensión caída en esta resistencia con una referencia interna de 0,5V, siendo la máxima corriente permitida  $I = 50\text{mV}/R_c$ . Este tipo de limitación es útil para alimentación de displays y otras aplicaciones, pero no para este caso.

Un tercer comparador viene incluido para detectar la caída de tensión a la salida. En nuestro caso lo vamos a utilizar para desconectar el MOSFET, lo que hace que el condensador de almacenamiento vuelva a cargarse. Se compara la entrada **LBI** con una referencia interna de 1,3V, por lo que solo ha de calcularse un divisor resistivo entre **Vout** y **LBI**, tomando como referencia para el cálculo la tensión de salida a la cual queremos que nos detecte. La salida de este comparador interno controla un FET de drenador abierto, de forma que cuando la salida cae por debajo del valor que queremos significa que la tensión en **LBI** ha caído por debajo de 1,3V, poniendo a nivel bajo la salida y desconectando el MOSFET. De esta forma comienza el ciclo con la carga del condensador.

En la figura 161 puede verse el montaje real del circuito electrónico de la figura 162. Además se incluye una fotografía del sistema completo, tal y como se ha dispuesto para la toma de medidas experimentales.

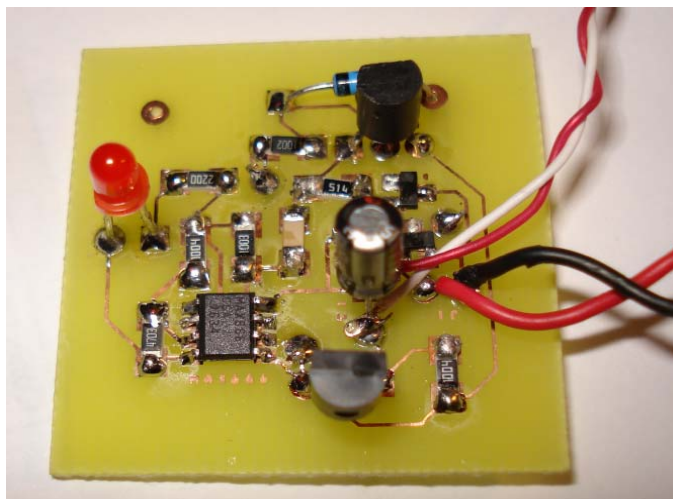


Fig. 161. Imagen del circuito electrónico.

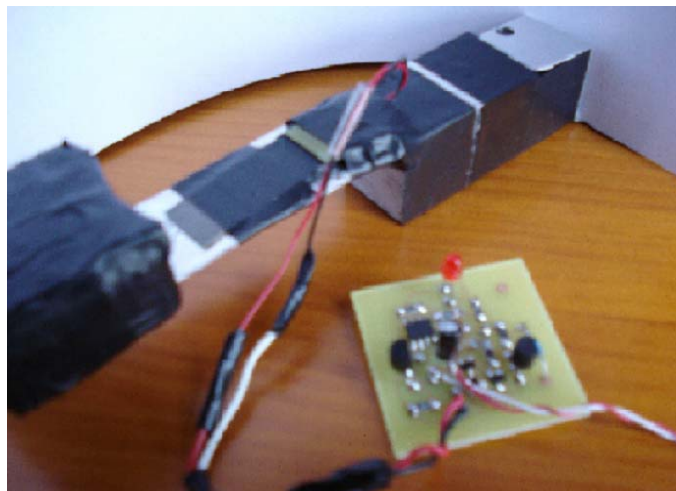


Fig. 162. Imagen del sistema completo.

El piezoeléctrico iba montado sobre la base de aluminio y unido a esta mediante cinta aislante. Este método de unión permite cierta amortiguación del esfuerzo, lo que aumenta la durabilidad del piezoeléctrico. Es obvio que esto provoca la pérdida de energía mecánica al flexionar el conjunto, y consecuentemente la reducción de los niveles de tensión y corriente de salida. Se ha hecho así debido a que solo se disponía de un único elemento generador. Además se pretendía observar la mejor disposición del mismo sobre el oscilador, lo que producía un constante cambio de su posición. Como otras posibilidades para amarrar el piezoeléctrico al oscilador están la de pegarlos con pegamento o utilizar dos chapas, una encima del piezoeléctrico y otra debajo del oscilador, que queden unidas por los dos lados mediante un tornillo y una tuerca.

En las figuras 163 puede observarse la carga del condensador de almacenamiento mientras se aplica esfuerzo al oscilador. El condensador va cargándose hasta alcanzar una tensión de aproximadamente 7,4 V (tensión inversa del zéner más la tensión emisor-base del transistor pnp). De esta manera se activa el pnp, que activa a su vez el transistor mosfet para provocar la descarga del condensador. En este momento, el regulador MAX666 transforma el nivel de 7,4 V en su entrada a 5 V a su salida para iluminar el diodo led.

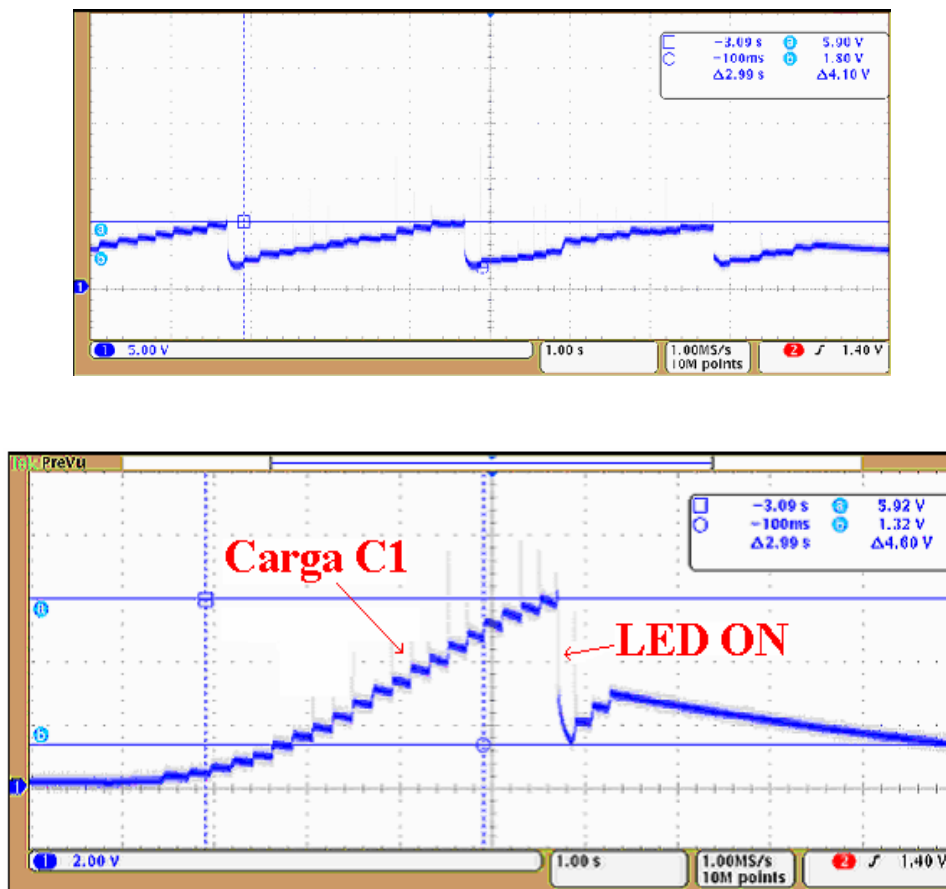


Fig. 163. Carga y descarga del condensador de 1µF.

### 3.2 Sistema electromagnético.

En el segundo de los casos se utilizará un sistema electromagnético de forma que una bobina estática induzca corriente a partir de la variación de flujo magnético producido por unos imanes en movimiento. Esta disposición, al igual que algunas otras, son generadores inerciales modelados como sistemas de segundo orden con excitación en la base, por lo que la potencia máxima cuando se igualan las pérdidas mecánicas y eléctricas es igual que en el caso del piezoelectrico:

$$P_{avelec} = \frac{m\omega^3 Y^2}{16\xi_P} \quad (48)$$

Hay que decir que no toda la energía eléctrica generada llega a la carga, ya que parte se disipa en la resistencia interna de la bobina, quedando la fórmula de la siguiente manera [14].

$$P_{L\max} = \frac{m\omega^3 Y^2}{16\xi_P} \left( \frac{R_{\text{load}}}{R_{\text{load}} + R_{\text{coil}}} \right) \quad (49)$$

La bobina utilizada tiene 120 espiras, con un diámetro del cobre de 0,3 mm. Está instalada en la base de aluminio del sistema. De esta forma se consigue no dificultar la salida de corriente al quedar estática. Los imanes van unidos mediante cianoacrilato al oscilador, formado por una fina chapa de aluminio de medidas 95 x 26 mm<sup>2</sup> que llega hasta una base de metacrilato. Los imanes escogidos son de NdFeB (neodimio-hierro-boro) de la marca Meder, cuya máxima densidad de energía es 295 KJ/m<sup>3</sup>, bastante más alta que otros imanes de la marca, como por ejemplo los de AlNiCo (aluminio-níquel-cobalto), con densidades máximas de hasta 40 KJ/m<sup>3</sup>. Por contra tienen una temperatura máxima de operación bastante más baja, aunque esto no es un problema para este caso, ya que es de hasta 160°C. Cada uno de ellos tiene unas medidas de 10 x 5 x 1,9 mm.

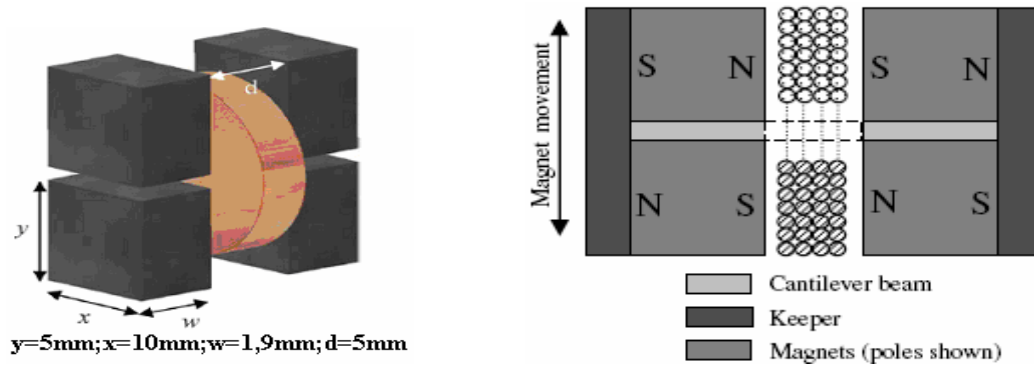


Fig. 164. Disposición de imanes alrededor de la bobina

Al disponer dos filas de imanes se consigue una mayor variación de flujo magnético en cada movimiento de vaivén, lo que aumenta la energía global. En la figura 165 se pueden ver los niveles de tensión pico a pico a circuito abierto respecto a la frecuencia, teniendo una aceleración constante en la base y una masa de 39,09 gramos a 35 mm de la misma. La máxima tensión de salida es de 95,6 mVpp, obtenida a 11,34 Hz. Esta tensión es demasiado pequeña para poderla transformar a niveles aceptables, a pesar de conseguir niveles de corriente eficaz entre 0,5 y 3 mA, suficiente para muchas aplicaciones de baja potencia como la que se ha expuesto en el apartado anterior. Por ejemplo, el encoder digital utilizado en el sistema del apartado 2.4.6 (“sistemas piezoeléctricos”) funciona con corrientes de operación entre 200 y 400  $\mu\text{A}$ .

En la figura 166 puede verse una variación de los niveles de tensión de salida a la frecuencia de resonancia (11,34 Hz), en función de la carga que ponemos a la salida del piezoeléctrico. La resistencia de salida donde se igualan los coeficientes de pérdidas mecánicas y eléctricas es de unos 130 $\Omega$ . La resistencia interna de la bobina se ha despreciado por ser muy baja (3 $\Omega$ ).

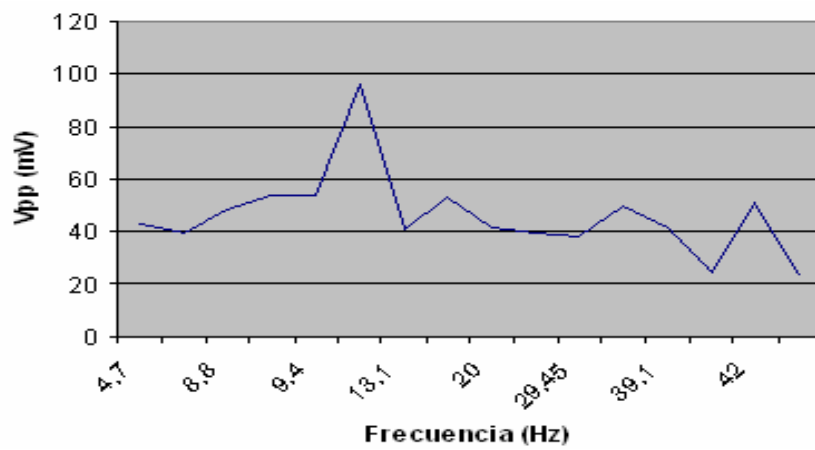


Fig. 165. Gráfica de tensión pico a pico respecto a la frecuencia de vibración.

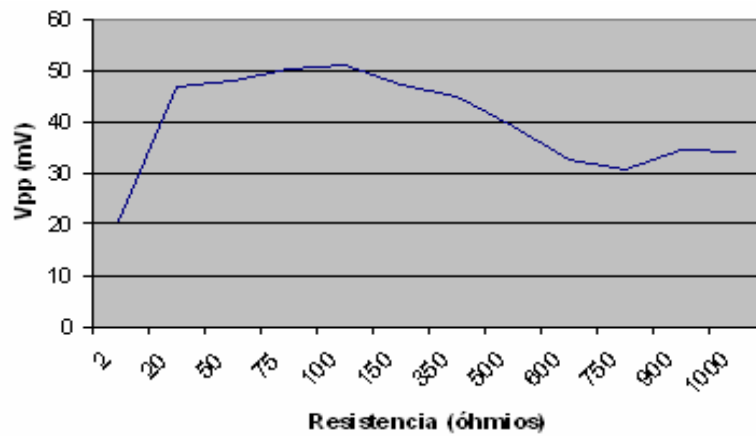


Fig. 166. Gráfica de tensión pico a pico respecto al valor de carga de salida.

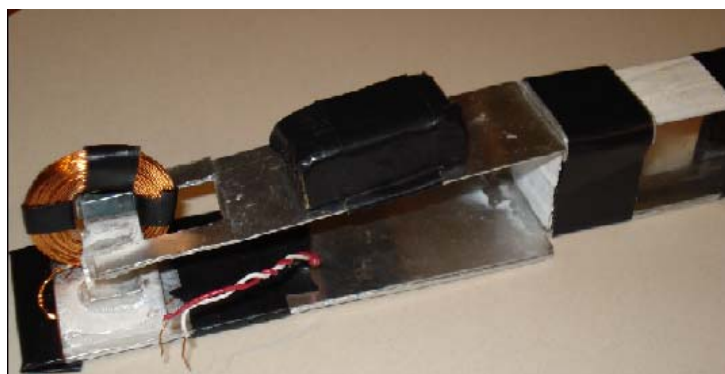


Fig. 167. Sistema magnético desarrollado.

### **3.3 Módulo solar.**

En este caso se dispone de un pequeño módulo de la marca Shinepower, modelo YH6060-8A80 obtenido de una lámpara solar. Este módulo tiene unas medidas de 60 x 60 mm, formado por ocho láminas de silicio monocristalino de 3 x 53 mm cada una, lo que da una superficie total de generación de 12,72 cm<sup>2</sup>. Los datos que aporta el fabricante de las capacidades del módulo son las siguientes:

Tipo	P <sub>máx</sub> (W)	I <sub>mp</sub> (mA)	V <sub>mp</sub> (V)	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (mA)
YH6060-8A80	0,32	80	4	4,8	84

P<sub>máx</sub>: potencia máxima ofrecida por el módulo.

I<sub>mp</sub>: corriente a la máxima potencia.

V<sub>mp</sub>: tensión a la máxima potencia.

V<sub>oc</sub>: tensión a circuito abierto.

I<sub>sc</sub>: corriente en cortocircuito.

Estos módulos suelen tener una gran captación de luz sin depender tanto del ángulo de incidencia. Por el contrario si sufren fuertes caídas en la generación al aumentar la distancia con el foco de luz.

Ángulo (°)	Tensión (V)	Distancia (m)	Tensión (V)
0	4,45	0,5	4,50
25	4,5	1	4
45	4,57	1,5	3,55
55	4,60	2	3,24
65	4,61	2,5	3,04
90	4,46	3	2,73

(a)

(b)

Tabla 17. (a) Tensión de salida en función del ángulo de incidencia y (b) de la distancia.

Estos datos se han obtenido a partir de una fuente de luz incandescente de 40 W, cuyo rendimiento luminoso está entre 12 y 18 lm/W (lumens por vatio) [28], siendo este dato el cociente entre el flujo luminoso producido y la potencia eléctrica consumida. Tomando un valor intermedio de 15 lm/W, el flujo luminoso total será de 600 lm, lo que se corresponde con una iluminancia de casi 471.700 lux. Para todas las medidas de la tabla izquierda se mantuvo la fuente a 22 cm del módulo. Como se ve en la tabla 19(a), la variación de tensión es casi inapreciable con distintos ángulos de incidencia, siendo óptimo entre 45° y 65°. No ocurre lo mismo con la distancia a la fuente de luz (tabla 19(b)), donde un alejamiento produce mayor dispersión de la luz, provocando una caída exponencial de la tensión. Esto es lo que sucede principalmente en lugares interiores, dado que la luz que entra del exterior es muy tenue y la producida por el alumbrado se dispersa con facilidad para que los rayos lleguen a toda la habitación. Esto redonda

muchas veces en tensiones y corrientes insuficientes para poder alimentar circuitos. Para la tabla de la derecha se utilizó una fuente de luz fija de  $22 \times 10^6$  lux y el módulo se colocó en dirección perpendicular respecto al suelo ( $90^\circ$ ).

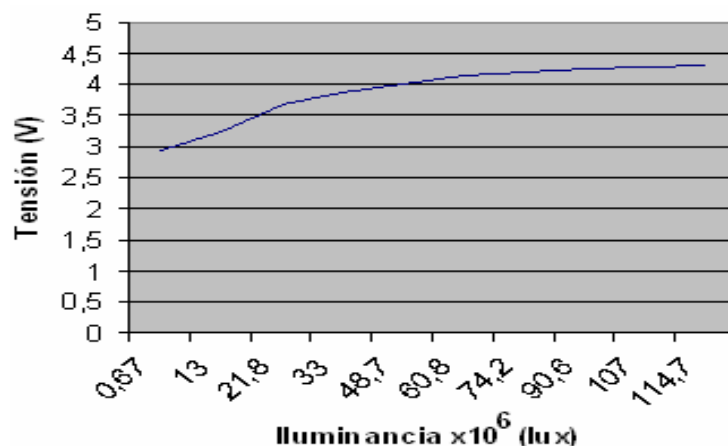


Fig. 168. Gráfica de tensión – iluminancia para el módulo solar.

La gráfica 168 se obtuvo con el módulo a 1,5 metros de la fuente. Como puede verse, el comportamiento de la tensión respecto a la luz es casi lineal hasta un valor de aproximadamente  $50 \times 10^6$  lux. A partir de este valor, la tensión crece muy poco para grandes variaciones de iluminancia.

Este módulo cargaba por el día dos baterías NiCd de 1,2V cada una para alimentar por la noche un diodo LED de alta luminiscencia. Este tipo de lámparas se pueden utilizar para marcar senderos para viandantes, coches e incluso en pistas de aterrizaje para avionetas. Con LEDs de bajo consumo se pueden formar paneles o señales luminosas para el tráfico o incluirlos junto a un circuito de control en semáforos para reducir el consumo nocturno de éstos. Otras aplicaciones son la de cargador de baterías para móviles, mandos a distancia, sistemas de monitorización de parámetros (humedad, temperatura...) en cultivos, etc. De hecho se tiende a integrar cada vez más la placa solar en el propio aparato para poderlo cargar en cualquier momento. Las baterías proporcionan, una vez cargadas, una tensión suficiente para alimentar sin problemas el mando a distancia de un televisor que use pilas AA de 1,5V.



Fig. 169. Placa solar modelo YH6060-8A80 de Shinepower.

### **3.4 Conclusiones.**

En este apartado final se ha resumido el estudio realizado sobre las capacidades de tres sistemas para el aprovechamiento de energía residual. Para el caso del sistema piezoeléctrico se ha demostrado una capacidad de generación máxima de unos 54  $\mu$ W para frecuencias en torno a los 20 Hz. La aplicación elegida es hacer lucir un simple diodo LED para indicar posición. Este sistema puede ir instalado en una bicicleta para generar a partir del movimiento lineal de la estructura al rodar.

Los elementos piezoeléctricos no están pensados inicialmente para alimentar sistemas, sino como sensores. A pesar de haberse optimizado las cerámicas piezoeléctricas basadas en materiales ferromagnéticos, no se han conseguido corrientes suficientes para hacer funcionar un sistema de forma directa. El piezoeléctrico elegido no obtiene más de 8,8  $\mu$ A<sub>pico</sub>/ Hz según el fabricante. Debido a ello se debe almacenar la energía hasta conseguir niveles adecuados de carga. Tienen, por el contrario, la capacidad de conseguir tensiones de incluso cientos de voltios en algunos casos. Esto y la posibilidad de hacerlos funcionar en paralelo (fuente de corriente) o en serie (fuente de tensión) permiten que se pueda modificar su uso según las necesidades. En nuestro caso es fácil conseguir tensiones de pico de 5 V, superándose los 20 V en algunos casos. Estas tensiones son adecuadas para las necesidades de cualquier chip.

Es importante utilizar materiales adecuados para que el piezoeléctrico no sufra deformaciones que puedan dañarlo. Como ya se indicó, la elección de la masa más adecuada para la aplicación que se quiere es vital. En segundo lugar está el material con que fabricamos el oscilador. En algunos proyectos similares se ha utilizado acero inoxidable tipo 302FH o BeCu, dado su buena resistencia a fatiga y flexibilidad. Aquí se ha dispuesto de 4 láminas de aluminio pegadas entre sí. La flexibilidad proporcionada es buena, aunque la resistencia a fatiga es baja. Esto hizo que se rompieran algunas de las láminas y hubiera que cambiarlas. Además se ha de tener una anchura de oscilador lo más parecida posible a la anchura del piezoeléctrico. Así se reducen las vibraciones en direcciones no deseadas, además de aumentar la deformación con menos esfuerzo. La longitud del oscilador viene definida por el punto donde coloquemos el piezoeléctrico. No ha de ser en ningún caso excesivamente grande (>10 cm). El piezoeléctrico debe ir bien pegado al oscilador mediante un pegamento que asegure que el primero no se comba, separándose del segundo y facilitando la ruptura. Cuando se quiere producir una flexión, como en este caso, todo el oscilador y, por tanto el piezoeléctrico, debe deformarse y volver a su forma original una vez cesa el esfuerzo.

En segundo lugar se ha desarrollado un sistema que genera energía en una bobina a partir de la variación de flujo magnético gracias a vibraciones producidas en su oscilador. Todo el conjunto debe ir anclado al lugar donde se produzcan las vibraciones que pretendemos aprovechar. De lo contrario el movimiento del oscilador es casi inapreciable. Las características que se han comentado para construir el oscilador del piezoeléctrico se deben trasladar aquí.

El sistema resultante es capaz de obtener corrientes de hasta 3 mA, pero a tensiones máximas pico a pico de 90 mV (potencias de pico de más de 140 mW). Este nivel de tensión es impracticable para cualquier aplicación. Para proyectos posteriores se debe optimizar la bobina para lograr un menor valor de resistencia interna y mejorar el enrollado que reduzca las capacidades parásitas. Es importante lograr la menor distancia posible entre los imanes y la bobina,



así como reducir el agujero de la bobina por donde pasarán las líneas de campo magnético (mayor densidad de líneas de fuerza).

En último lugar se han investigado las capacidades de un pequeño módulo solar utilizado en aplicaciones comerciales. Como ya se mencionó, estos módulos pueden alimentar durante el día pequeños circuitos. También se puede almacenar la energía para utilizarla en cualquier momento. Dentro de edificios pueden generar a partir de luces interiores, aunque su rendimiento se reduce considerablemente (la corriente entregada es menor), ya que la energía entregada es considerablemente menor a la del Sol y haber una mayor dispersión de la luz en las bombillas, ya que tienen un gran ángulo de iluminación.

El módulo solar del que se dispone es capaz de obtener hasta 5 V en circuito abierto y corrientes de más de 30 mA para una carga de 1 k $\Omega$  en condiciones de pleno Sol. La energía obtenida durante el día es capaz de hacer lucir un led durante toda la noche a su máxima intensidad. Es un sistema que no depende en demasía de su ángulo de orientación, por lo que se suelen disponer paralelos al suelo para aprovechar todos los ángulos de incidencia y ocupar el menor espacio. Su comportamiento con la luz es normalmente lineal, ganando rápidamente tensión con aumentos de luz relativamente pequeños. Cuando llegan a un nivel de salida cercano al máximo y se sigue aumentando la irradiancia tienden a un comportamiento exponencial, aumentando casi nada su nivel de tensión para grandes aumentos en la irradiancia. Si se dispone el módulo muy cerca del foco en lugares interiores, tiende a saturarse, reduciéndose incluso su salida debido a la pérdida de rendimiento por calor. En lugares exteriores es importante colocar el módulo en una posición adecuada donde pueda recibir la mayor cantidad posible de luz.

## Presupuesto.

### 4. PRESUPUESTO.

#### 4.1 Costes de material.

Componente	Modelo	Número	Precio total (€)
Diodo Schottky	PHILIPS BAT754A	3	0,507
Regulador lineal	MAX666CPA+	1	5,50
Diodo zener	PHILIPS BZX79-C6V8	1	0,18
Transistor PNP	PHILIPS BC557	1	0,124
Mosfet canal N	PHILIPS PMV31XN	1	0,42
Elemento Piezoeléctrico	PIEZO SYSTEMS Modelo Q220-A4-303YB	1	121,36
Diodo LED	LED TECHNOLOGY Modelo L07R3000F1	1	0,58
Resistencias SMD		7	2,2
Condensador	10 µF/ 35 V	1	0,23
Condensador	0,1 µF/ 35 V	1	0,033
Imán NdFeB	MEDER 10x5x1,9mm	4	4,40
Chapa aluminio 5 x 15 cm		1	5
Base metacrilato		2	8
Cable 2m		1	1
Placa base		1	3
<b>TOTAL</b>			<b>152,53</b>

#### 4.2 Costes de desarrollo.

Actividad	€/hora	Número	Coste (€)
Diseño y fabricación	30	100	3000
Documentación	10	10	100
<b>TOTAL</b>			<b>3100</b>

## Presupuesto.

---

### 4.3 Presupuesto.

Tipo de coste	Coste (€)
Coste de material	152,53
Coste de desarrollo	3100
Costes totales	3252,53
<b>I.V.A. (16%)</b>	<b>520,40</b>

<b>Presupuesto total del proyecto</b>	<b>3772,93 (€)</b>
---------------------------------------	--------------------

### **5. CONCLUSIONES.**

En este trabajo se han presentado diversas fuentes de energía alternativas a las actualmente utilizadas. Se han explicado brevemente los principios en los que se basan y profundizado en los métodos por los cuales se consigue obtener energía eléctrica gracias al estudio de proyectos reales. Todo ello con el fin de realizar un estudio preliminar que sirva de punto de partida para futuros proyectos más específicos sobre este tipo de dispositivos.

Según los sistemas presentados se distinguen 6 tipos claramente diferenciados:

- **Sistemas solares:** consiguen actualmente buenos niveles de tensión (voltios) y corriente (miliamperios) con un área útil entre 10 y 50 cm<sup>2</sup> (en algunos casos mayor) y niveles de luz relativamente bajos (unos 9000 lux), aunque es preferible su uso al aire libre, ya que la energía de radiación del Sol es muy superior a la que ofrecen la luz de alumbrado. En algunos recintos cerrados es posible aprovechar la luz solar. Debido a esto son adecuados para alimentar sistemas electrónicos de bajo consumo (< 5 W) en campos agrícolas (redes de sensado), sistemas de transmisión de datos por radiofrecuencia (RFID tags), ciertos aparatos portátiles, cargadores, etc.
- **Sistemas termoelectricos:** con los materiales y tecnología actuales se consiguen, dependiendo el número de elementos N-P, su disposición y forma, hasta unidades de voltio y decenas de microamperios para saltos térmicos de unos pocos grados centígrados. Con variaciones elevadas de temperatura (>100° C) se consiguen, en algunos casos, hasta unidades de vatio. De esta forma es posible sustentar de forma continuada o en determinados momentos ciertos dispositivos con consumos por debajo de 100 μW.
- **Sistemas químicos:** basados en la reacción química del hidrógeno o metanol como combustibles son capaces de desarrollar hasta unidades de vatio en función de su tamaño, con densidades de más de 100 mW/cm<sup>2</sup>. Tienen autonomía suficiente para rentabilizar su uso con respecto a las baterías convencionales, lo que favorece su uso en aparatos portátiles como reproductores de música, teléfonos portátiles, agendas electrónicas, etc.
- **Sistemas electromagnéticos:** registran eficiencias en la conversión generalmente más altas que el resto de sistemas (a partir de un 30%). Son muy dependientes de la frecuencia, lo que hace que obtengan tensiones por debajo de 1 V y densidades de potencia por debajo de 1 μW/ cm<sup>3</sup>. A pesar de ello pueden desarrollar un amplio abanico de capacidades de energía en función de su tamaño y la forma de uso.
- **Sistemas electrostáticos:** su uso queda restringido a la alimentación de dispositivos electrónicos de muy bajo consumo (sensado), dada la escasa energía que desarrollan (< 10 μW/ cm<sup>3</sup>). Además necesitan una fuente inicial de carga y electrónica de control.
- **Sistemas piezoeléctricos:** obtienen energía directamente al deformarlos. Su buen nivel de tensión de salida y la posibilidad de funcionar en paralelo junto a otros

## **Conclusiones.**

---

piezoeléctricos les proporciona buenas perspectivas de utilización. Suelen tener una densidad de energía menor de  $10 \mu\text{W}/\text{cm}^3$  con niveles de frecuencia por debajo de los 100 Hz, y eficiencias por debajo del 15 % en la conversión mecánico-eléctrica. Como aplicaciones posibles, cuenta con posibilidades en el campo de las redes de sensado y transmisión de datos a través de radiofrecuencia.

### **6. TRABAJOS FUTUROS.**

Al comenzar este proyecto se marcaron básicamente dos objetivos: estudiar las diferentes posibilidades de sistemas de alimentación autónoma en el campo de la microgeneración y analizar experimentalmente las capacidades de algunos de ellos. Para el segundo objetivo se ha buscado una aplicación muy sencilla como comienzo para posteriores proyectos, por lo que en el futuro se deberán abordar aplicaciones más complejas, posiblemente con mayores consumos de energía. Esto implica la elección de un elemento generador adecuado, así como la optimización en su utilización. Como se ha visto a lo largo de los diferentes capítulos, las posibles aplicaciones son muchas, y su inclusión en sistemas comerciales es enorme. De hecho existen empresas que facturan millones de euros al año con su venta.

Las consecuencias observadas al realizar el estudio experimental dan como resultado las siguientes medidas a la hora de fabricar un sistema de este tipo.

- La elección del material con que se fabrica un elemento que sirva de oscilador es determinante. El uso de ciertos tipos de acero parece ser la opción más adecuada, dada su capacidad flexora y esfuerzo a fatiga. De hecho en este proyecto se han utilizado varias capas pegadas de aluminio, produciéndose la rotura de varias de ellas durante las pruebas. Esto provoca el desgaste prematuro, en este caso, del piezoeléctrico. Así mismo se ha de evitar el contacto directo de éste con el oscilador.
- Se debe fabricar el oscilador con unas medidas adecuadas de longitud y anchura, para evitar ante todo la pérdida de flexión por las fuerzas laterales que se producen. También se busca la máxima reducción de tamaño posible.
- Amarrar adecuadamente el conjunto generador al medio que transmite las vibraciones o esfuerzos. De lo contrario, la masa que se añade no producirá el efecto deseado y se trabajará a frecuencias más altas, produciendo desgastes mecánicos innecesarios.
- En el caso del sistema electromagnético, el diseño del oscilador sigue las mismas prerrogativas de los puntos anteriores. Por otro lado se ha de disponer de un bobinado suficiente para la aplicación deseada y reducir al máximo el agujero donde se concentran las líneas de fuerza. También se ha de reducir la distancia entre imanes y su tamaño. Así se cambiará más rápidamente el sentido del flujo magnético.
- En el caso del módulo solar, ha de tenerse en cuenta básicamente la elección adecuada del medio donde va a instalarse. Se ha de realizar un estudio de las diferentes capacidades de energía obtenida según la radiación existente.

## **7. REFERENCIAS.**

- [1] “Fabrication and modeling of an in-plane thermoelectric micro-generator”  
A.Jacquot, W.L. Liu, G. Chen, J.- P. Fleurial, A. Dauscher, B. Lenoira.
- [2] “Frequently Asked Questions about Thermoelectric Power Generation”. Tellurex Corporation.
- [3] “Recent Concepts in Thermoelectric Power Generation”. Gao Min and D. M Rowe. School of Engineering, Cardiff University.
- [4] “Development of Micro/Nano Thermoelectric Power Generators Using Electrodeposition”. J.P Fleurial, G.J Snyder, C.K: Huang, J. Herman, M.A. Ryan, N. Myung and J. Whitacre. Jet Propulsion Laboratory/ California Institute of Technology.
- [5] “400 Elements ErAs:InGaAs/InGaAlAs Superlattice Power Generator. Gehong Zeng, Je-Hyeong Bahk, John E. Bowers, Joshua M. O. Zide, Arthur C. Gossard, Yan Zhang, Rajeev Singh, Zhixi Bian, Ali Shakouri, Woochul Kim, Suzanne Singer and Arun Majumdar. University of California.
- [6] “Long-Lasting, self-sustaining and energy harvesting system in package wireless micro sensor solution”. Erick O. Torres and Gabriel A. Rincón-Mora. International conference on energy, enviroment and disasters (INCEED), July 24-30, 2005, Charlotte, NC, USA.
- [7] “Energy Harvesting from Passive Human Power”. M. Loreto Mateu Sáez. PhD Thesis Project in Electronic Engineering. January 2004.
- [8] “Proximity Identification and Tracking for Mining Automation”. Garry Einicke CSIRO Exploration and Mining, AUSTRALIA.
- [9] “Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics”. Joseph A. Paradiso, Massachusetts Institute of Technology Media Laboratory and Thad Starner, Georgia Institute of Technology, GVU Center.
- [10] “Energy harvesting chips and the quest for everlasting life”. Erick O. Torres and Gabriel A. Rincón-Mora.
- [11] “Human Generated Power for Mobile Electronics”. Joseph A. Paradiso, Massachusetts Institute of Technology Media Laboratory and Thad Starner, Georgia Institute of Technology, GVU Center.
- [12] “Energy Harvesting for Mobile Computing”. Joe Paradiso, Responsive Enviroments Group, MIT Media Lab.

## **Referencias.**

---

[13] “PCB Integrated Micro-Generator for Wireless Systems”. Neil N. H. Ching, Gordon M. H. Chan, Wen J. Li, Hiu Yung Wong and Philip H. W. Leong, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong.

[14] “Macro and Micro Scale Electromagnetic Kinetic Energy Harvesting Generators”. S. P. Beeby, M. J. Tudor, R. N Torah and E. Koukharenko, University of Southampton, UK. S. Roberts, Perpetuum Ltd ([www.perpetuum.co.uk](http://www.perpetuum.co.uk)) T. O'Donnell and S. Roy of the Tyndall National Institute.

[15] “A Laser-Micromachined Multi-Modal Resonating Power Transducer for Wireless Sensing Systems”. Neil N. H. Ching, H. Y. Wong, Wen J. Li, Philip H. W. Leong, Zhiyu Wen.

[16] “An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems” P. Glynne-Jones, M.J. Tudor, S.P. Beeby, N.M. White. Department of Electronics and Computer Science, University of Southampton, Southampton, UK.

[17] “Toward the Integration of Microsystems Supply”. Bruno Estibals , Corinne Alonso , Alain Salles , Angel Cid-Pastor 1, Henri Camon, Luis Martínez-Salamero.

[18] “Dynamic Simulation of an Electrostatic Power Microgenerator. W. Ma, M. Wong and L. Rufer. Hong Kong University of Science and Technology and TIMA Laboratory, Grenoble, France.

[19] “Comparison of SOI Power Device Structures in Power Converters for High-Voltage, Low-Charge Electrostatic Microgenerators”, Bernard H. Stark and T. C. Green

[20] “Microsystem Technologies for Mobile Communication Products”. Tapani Ryhänen, Nokia Research Center.

[21] “Vibration-to-Electric Energy Conversion”. Scott Meninger, Jose Oscar Mur-Miranda, Rajeevan Amirtharajah, Anantha P. Chandrakasan, and Jeffrey H. Lang. IEEE.

[22] “Electrostatic Vibration-to-Electric Energy Conversion”. Thesis by José Oscar Mur Miranda.

[23] Panasonic Solar Cells Technical Handbook 98/99.

[24] “Física”. José Aguilar Peris, José Doria Rico y Juan de la Rubia Pacheco. Editorial Anaya.

[25] Proyecto fin de carrera: “Estudio económico y de viabilidad de sistemas fotovoltaicos”.



## **Referencias.**

---

[26] “Water-activated disposable and long shelf life microbatteries”. Firas Sammoura, Ki Bang Lee and Liwei Lin, University of California at Berkeley.

[27] “Urine-Activated Paper Batteries for Biosystems”. Ki Bang Lee. Institute of Bioengineering and Nanotechnology, Singapore.

[28] Definiciones: [www.Wikipedia.es](http://www.Wikipedia.es)

[29] “A One-Compartment, Direct Glucose Fuel Cell for Powering Long-Term Medical Implants”. F. von Stetten, S. Kerzenmacher, A. Lorenz, V. Chokkalingam, N. Miyakawa R. Zengerle, and J. Duccree. University of Freiburg - IMTEK, Laboratory for MEMS Applications.

[30] “A Miniature Direct Methanol Fuel Cell using Platinum Sputtered Microcolumn Electrodes with Limited Amount of Fuel”. Young Ho Seo and Young-Ho Cho. Digital Nanolocomotion Center. Korea Advanced Institute of Science and Technology.

[31] “Direct Methanol Fuel Cells”. Piotr Zelenay, Xiaoming Ren, François Guyon, Huyen Dinh, John Davey, Shimshon Gottesfeld. Materials Science and Technology Division Los Alamos National Laboratory.

[32] “Towards a piezoelectric vibration-powered microgenerator”. P. Glynn-Jones, S.P.Beeby and N.M.White.

[33] “Actuadores Piezoeléctricos”. Miguel Cúpich Rodríguez y Fernando J. Elizondo Garza.

[34] “Architectures for Vibration-Driven Micropower Generators”. Paul D. Mitcheson, Tim C. Green, Eric M. Yeatman and Andrew S. Holmes. IEEE.

[35] “Micro Power Generation using Thermal Bubbles”. Ho-Young Kim, Heon Ju Lee, Young Soo Chang and Yoon Pyo Lee. Seoul National University and Korea Institute of Science & Technology.

[36] “Piezoelectric Generator for Powering Remote Sensing Networks”. Moncef Benjamin. Tayahi and Bruce Johnson. University of Nevada, Reno

[37] “Optimized Piezoelectric Energy Harvesting Circuit using Step-Down Converter in Discontinuous Conduction Mode”. Geoffrey K. Ottman, Heath F. Hofmann and George A. Lesieutre. IEEE.

[38] “Piezoelectric Micro Power Generator for Energy Harvesting”. R. Sood, Y.B. Jeon, J.-h. Jeong and S.G. Kim. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge.

[39] “Electric Power Generation Within Orthopaedic Implants Using Piezoelectric Ceramics”.

## **Referencias.**

---

[40] “Investigation of a Resonance Microgenerator”. Makoto Mizuno and Derek G Chetwynd. Nanotechnology and Advanced System Research Laboratories, Canon Incorporation and Centre for Nanotechnology and Microengineering, University of Warwick, UK.

[41] “A Demonstration of Useful Electric Energy Generation from Piezoelectric in a Shoe”. Thesis by Nathan S. Shenck.

[42] “Pervasive Power: A Radioisotope-Powered Piezoelectric Generator”. Amit Lal, Rajesh Duggirala, and Hui Li. Cornell University.

[43] Página oficial de EnOcean, empresa dedicada a la fabricación de sistemas de transmisión alimentados con elementos solares, magnéticos y piezoeléctricos.

**<http://www.enocean.com/>**

[44] Página oficial de Fadisel, fabricante de productos eléctricos.

**<http://www.fadisel.com/>**

[45] “I, Cyborg: Electronics In and On the Body”. Powering Implants: Is Internal Energy Storage Necessary?. Ryan D. Gow.

[46] “Redes inalámbricas de sensores ambientales”. Teresa Olivares, Luis Orozco, Vicente López, Pablo Bermejo y Paz Pedrón. Universidad de Castilla-La Mancha.

[47] “MEMs Fuel Cell Technology”. Instituto Cea.

[48] “A Micro Hydrogen-Air Fuel Cell”. Robert F. Savinell, C.C. Liu, M.H. Litt and J.S. Wainright. Case Western Reserve University, Cleveland.

[49] Página oficial de Morgan Electroceramics, fabricante de materiales piezoeléctricos.

**<http://www.morgan-electroceramics.com>**

[50] Página oficial de Tecnoregalos para venta de productos por Internet.

**<http://www.tecnoregalos.com>**

[51] Página oficial de FerroSolutions, especializada en pequeños generadores y sensores para medición en medios acuáticos.

**<http://www.ferrosi.com>**

[52] “Ceramics Micro Fuel Cells”. Dr. Michael Stelter y Dr. Uwe Partsch.

## **Referencias.**

---

[53] Página de noticias DcViews.

**<http://www.dcviews.com/press/Toshiba-Methanol-Fuel-Cell.htm>**

[54] Página oficial de Biophan Technologies. Inc, empresa dedicada a la fabricación de sistemas aplicados en medicina.

**<http://www.biophan.com>**

[55] Página de noticias Gadget Review.

**<http://www.gadgetreview.com/2006/01/water-powered-clock.html>**

[56] “Unobtrusive Integration of Magnetic Generator Systems into Common Footwear”. Jeffrey Yukio Hayashida. Massachusetts Institute of Technology.

[57] “Harvesting energy into lithium-ion batteries”. Erick O. Torres, Student Member, IEEE, and Gabriel A. Rincón-Mora, Senior Member, IEEE Georgia Tech Analog and Power IC Design Lab.

[58] Tesis doctoral “Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion” por Shadrach Joseph Roundy, 2003.

[59] “Human Powered Piezoelectric Batteries to Supply Power to Wearable Electronic Devices”. José Luis González, Antonio Rubio y Francesc Moll. Electronic Engineering Department, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.

[60] Página oficial de Shinepower Yuhuan Solar Energy Source, compañía china dedicada a la fabricación de módulos y minimódulos fotovoltaicos.

**<http://www.shinepower.cn/jj.htm>**

[61] “Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezoelectrics”. Artículo de Nathan S. Schenck y Joseph A. Paradiso. MIT Media Laboratories.

[62] Artículo “Micro-Engines”. Department of Engineering, University of Cambridge. 11 January 2006. ([http://www.eng.cam.ac.uk/news/stories/2006/micro\\_engines/](http://www.eng.cam.ac.uk/news/stories/2006/micro_engines/))

[63] Artículo de InfoWorld sobre las células de combustible de Sony en:

**[http://www.infoworld.com/article/07/08/23/Sony-runs-Walkman-off-sugar-based-bio-battery\\_1.html](http://www.infoworld.com/article/07/08/23/Sony-runs-Walkman-off-sugar-based-bio-battery_1.html)**

[64] Tesis doctoral “Inductive Links with Integrated Receiving Coils for MEMS and Implantable Applications” por Jie Wu, septiembre 2003.

## **Referencias.**

---

[65] Hoja de características de “The Micro Generating System for Pedal Illumination”. Kinetron.

[66] “Células solares de silicio amorfo” en:

**<http://www.fao.ub.es/recerca/aplicada/fotovoltaic/es/node2.html>**

[67] “Self Powered Big Brother”. Yaohao Chen, Eddie Chia, Vladimiro Dagkas Tsoukalas, Pietro Franchi, Jeremy Leow, Guangfan Tan.

[68] Página oficial de Brunton, compañía dedicada a la fabricación de placas solares fijas y flexibles para sistemas portátiles.

**<http://www.brunton.com>**

[69] Artículo de tecnología solar en **<http://www.portalsolar.com/paneles-solares-hibridos-teoria.html>**.

## **8. LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.**

### **Figuras.**

- Fig. 1. Gráfico de potencia y duración de vida para fuentes y reservas de energía.
- Fig. 2. Espectros de frecuencia con el desplazamiento y la aceleración: en la carcasa de un microondas (a y b) y en la base de una máquina de moler (c y d).
- Fig. 3. Reguladores lineales: (a) regulador con zéner en paralelo con la carga; (b) regulador con transistor en serie con la carga.
- Fig. 4. Convertidores continua-continua conmutados: (a) reductor; (b) elevador.
- Fig. 5. Diagrama de bloques de las distintas etapas en dos topologías diferentes.
- Fig. 6: Distribución de la irradiancia en el espectro solar
- Fig. 7. Actuación de los fotones según su energía.
- Fig. 8. Dibujo del funcionamiento básico para una placa Sunceram II de Panasonic.
- Fig. 9. Composición de una célula solar y células comerciales para microgeneración.
- Fig. 10. Gráfico de tensión- iluminación para la célula BP-376634 de Panasonic.
- Fig. 11. Sistema BP-6B142UA de Panasonic con su esquema y cuadro de características.
- Fig. 12. (a) Indicador de posición para bicicleta; (b) Lámpara de jardín solar.
- Fig. 13. Productos alimentados con energía solar.
- Fig. 14. (a) Llaverio antimosquitos, (b) extractor de aire y (c) ionizador de agua.
- Fig. 15. Placas solares aplicadas como cargador y sistema de bombeo.
- Fig. 16. Radar de velocidad.
- Fig. 17. (a) Placa enrollable de silicio amorfo; (b) Chaqueta con placas flexibles; (c) Ordenador y teléfono portátiles alimentados con placa solar enrollable.
- Fig. 18. Imagen interior del sistema transmisor STM 250.
- Fig. 19. (a) Esquema del sistema STM 250; (b) Aspecto final.
- Fig. 20. Transmisor STM 100.
- Fig. 21. Esquema del transmisor STM 100.
- Fig. 22. Nodo de una red de sensores.
- Fig. 23. Sistema wireless utilizado en agricultura.
- Fig. 24. Proceso de generación de energía mediante un termopar.
- Fig. 25. Medida de tensión en una termounión con semiconductores N y P.
- Fig. 26. Estructura de una célula de calor.
- Fig. 27. Unión de células en serie.
- Fig. 28. (a) Placa multinivel; (b) Curvas de rendimiento de materiales termoeléctricos.
- Fig. 29. Esquema de funcionamiento.
- Fig. 30. Imágenes del proceso de fabricación.
- Fig. 31. Reloj de pulsera Seiko Thermic.
- Fig. 32. Imagen del generador termoeléctrico LPTG de la empresa D.T.S.
- Fig. 33. Módulo termoeléctrico en un proyector.
- Fig. 34. Principio de funcionamiento de la célula de metanol.
- Fig. 35. Gráfico de densidad de corriente para una variación del potencial con microcanales hexagonales y cuadrados.
- Fig. 36. Gráfico tensión en circuito abierto a lo largo del tiempo para ambos tipos de microcanales.
- Fig. 37. Proceso de fabricación de la célula.

## **Lista de figuras y tablas.**

---

- Fig. 38. Vista ampliada de los electrodos: (a) cuadrados y (b) hexagonales.
- Fig. 39. Célula LTCC de metanol.
- Fig. 40. Funcionamiento de una célula de hidrógeno.
- Fig. 41. Composición de una célula de hidrógeno.
- Fig. 42. Gráfico de densidad de potencia durante más de 200 horas de operación.
- Fig. 43. Gráfico tensión-corriente-potencia para el hidrógeno de dos fuentes diferentes.
- Fig. 44. Célula con generación de hidrógeno a partir de  $\text{NaBH}_4$ .
- Fig. 45. Células de hidrógeno de distintos tamaños.
- Fig. 46. Sistemas de la empresa Toshiba: (a) batería de metanol; (b) reproductores Mp3 de Toshiba; (c) recarga del reproductor.
- Fig. 47. Ordenador portátil de Fujitsu, unido a su batería y depósito de metanol recargable.
- Fig. 48. Célula doble alimentando un teléfono móvil.
- Fig. 49. Teléfono Motorola alimentado con cartuchos de metanol.
- Fig. 50. Gráfico de potencia para la célula doble de MTI Microfuel Cells.
- Fig. 51. Célula de MTI Microfuel Cells.
- Fig. 52. DMFC de 30 células y resultados obtenidos a  $60^\circ\text{C}$  y 0,76 atmósferas de presión.
- Fig. 53. (a) Red de sensores wireless; (b) Sistema RFID implantado en la mano.
- Fig. 54. Partes de la batería de agua y su funcionamiento.
- Fig. 55. Burbujas en la salida del puerto.
- Fig. 56. Gráfico de tensión en una célula de 12 mm x 12 mm, cámara de reacción de 100  $\mu\text{m}$  y resistencia de carga de 1  $\text{k}\Omega$  para diferentes compuestos del cátodo.
- Fig. 57. Gráfico de tensión medida en una célula de 8mm x 8mm para distintos valores de carga, con una cámara de reacción de 100  $\mu\text{m}$  de alto y AgCl como cátodo.
- Fig. 58. Gráfico de tensión en el tiempo variando la superficie de los electrodos, con una cámara de reacción de 100  $\mu\text{m}$  de alto y AgCl como cátodo.
- Fig. 59. Gráfico de tensión en el tiempo para distintas profundidades de la cámara de reacción, en una batería de 12 x 12 mm con una carga de 1  $\text{k}\Omega$  y AgCl como cátodo.
- Fig. 60. Microcélula con un área de 8 x 8 mm; izquierda: partes del proceso de fabricación; derecha superior: vista aérea; derecha inferior: sección de la misma, con sus electrodos y cámara de reacción.
- Fig. 61. Calculadora con batería de agua.
- Fig. 62. Sensor de humedad alimentado por agua.
- Fig. 63. (a) Reacciones en ánodo y cátodo; (b) Foto de la célula.
- Fig. 64. Sección de la batería. Detalle del ánodo y la matriz de hidrogel.
- Fig. 65. Estructura de la batería.
- Fig. 66. (a) Gráfico densidad de potencia-tiempo de operación; (b) Gráfico tensión-densidad de corriente- densidad de potencia; (c) Gráfico potencia total de salida durante una semana.
- Fig. 67. (a) Fabricación del electrodo de la fuel cell; (b) Ensamble de electrodos y membranas; (c) Vista lateral de la fuel cell terminada.
- Fig. 68. Distintas vistas de un ventilador alimentado con glucosa.
- Fig. 69. Esquema de funcionamiento del ventilador.
- Fig. 70. Generador de glucosa.
- Fig. 71. Composición de una célula de orina.
- Fig. 72. (a) Gráfico de tensión de salida para 0,2 ml de orina añadida y resistencias de 1 y

## **Lista de figuras y tablas.**

---

10 k $\Omega$ ; (b) Comparación entre tensiones de salida para la carga de 10 k $\Omega$  tras la primera y la segunda adición de orina, pasando entre ambas 15 horas.

Fig. 73. Proceso de fabricación y sección de la célula.

Fig. 74. Célula de orina terminada.

Fig. 75. Esquema de inducción de corriente en una espira mediante el giro de ésta.

Fig. 76. Generación de energía mediante movimiento lineal de un imán en una bobina.

Fig. 77. Dinamo de la marca Fadisel y sus características.

Fig. 78. Imágenes por ordenador del dispositivo generador.

Fig. 79. (a) Esquema del sistema generador; (b) Esquema eléctrico del sistema para la medición de temperatura.

Fig. 80. (a) Potencia de salida RMS - resistencia de salida; (b) Gráfico con la tensión de salida sin carga y la tensión rectificada.

Fig. 81. Imagen completa del sistema.

Fig. 82. Prototipos A (arriba) y B (abajo) para el aprovechamiento de vibraciones.

Fig. 83. (a) Gráfico de tensión en bobina - amplitud de vibración; (b) Gráfico de potencia de salida- resistencia de carga para el prototipo A.

Fig. 84. (a) Gráfico de tensión en bobina - amplitud de vibración; (b) Gráfico de potencia de salida del prototipo B montado en un coche - tiempo.

Fig. 85. (a) Generador de FerroSolutions; (b) Generador de Perpetuum.

Fig. 86. (a) Sistema de frenado de un coche; (b) Posibles zonas de instalación del sistema.

Fig. 87. (a) linterna autoalimentada; (b) punteros láser que se cargan al agitarlos; (c) interior de la linterna (generador y electrónica de conversión).

Fig. 88. Sistema microgenerador doble de imán permanente y bobina.

Fig. 89. (a) Sistema de control y transmisión autoalimentado PTM 200; (b) Diagrama de bloques del conjunto.

Fig. 90. Juguete con melodías.

Fig. 91. Sistema de bajada y subida de ventanillas.

Fig. 92. Mecanismo del reloj ETA Autoquartz.

Fig. 93. Reloj ETA Autoquartz.

Fig. 94. Sistema generador Seiko AGS (Automatic Generating System).

Fig. 95. Sistema AGS utilizado en animales marinos.

Fig. 96. Linterna autoalimentada con función de cargador y sus adaptadores.

Fig. 97. (a) Sistema integrado en el zapato; (b) Transformación de una pisada en un giro de las dinamos.

Fig. 98. Gráfico de potencia en función de la carga utilizada a la salida.

Fig. 99. (a) Sistema externo al zapato; (b) Gráficos de tensión y potencia en el tiempo para una carga de 10  $\Omega$ .

Fig. 100. (a) Sistema de generación con el peso de una mochila; (b) Bolo eléctrico del MIT.

Fig. 101. Carro de la compra con sistema generador.

Fig. 102: (a) Ordenador portátil autoalimentado; (b) Sistema en pedal de bicicleta.

Fig. 103. Tres posibles topologías de microgeneradores electrostáticos.

Fig. 104. (a) Circuito equivalente del convertidor electrostático con condensador de almacenamiento externo; (b) Esquema completo del sistema generador.

Fig. 105. Etapa de precarga.

Fig. 106. Etapa de obtención de energía.

- Fig. 107. Etapa de recuperación.
- Fig. 108. Generador electrostático basado en la compresión de un elastómero dieléctrico cargado: (a) prototipo implementado en una bota; (b) detalle del generador.
- Fig. 109. Generador electrostático fabricado en tecnología MEMS por el MIT: (a) una porción del hueco del condensador; (b) dibujo del sistema.
- Fig. 110. (a) Circuito electrónico manteniendo la tensión constante; (b) Circuito electrónico manteniendo la carga constante.
- Fig. 111. Microgenerador desarrollado en el Imperial College.
- Fig. 112. Imagen del convertidor reductor.
- Fig. 113. Las cuatro fases de operación del convertidor reductor.
- Fig. 114. Generador en almohada: (a) vista lateral; (b) vista aérea.
- Fig. 115. Celda elemental del PZT: (a) estructura cúbica (por encima de la temperatura de Curie); (b) estructura tetragonal (por debajo de la temperatura de Curie).
- Fig. 116. Momentos del dipolo eléctrico en el dominio de Weiss: (a) antes de la polarización; (b) durante la polarización; (c) después de la polarización.
- Fig. 117. Sistema piezoeléctrico de la Universidad de Pittsburg.
- Fig. 118. Partes del sistema y su esquema de funcionamiento (MIT).
- Fig. 119. Energía de los piezoeléctricos: PZT (abajo) y del PVDF (arriba).
- Fig. 120. Circuito electrónico del sistema.
- Fig. 121. (a) PZT del talón; (b) PVDF para la parte delantera; (c) Disposición; (d) Sistema terminado con su electrónica de conversión, sistema de almacenamiento, codificador ID y transmisor a 300 MHz.
- Fig. 122. (a) Gráfico de tensión-tiempo en el condensador de almacenamiento y en la transmisión; (b) Dibujo del sistema completo.
- Fig. 123. (a) Generador piezoeléctrico; (b) Concentrador de sonido.
- Fig. 124. (a) RFID tags utilizadas en librerías; (b) RFID tag usada como detector en peajes.
- Fig. 125. (a) Elementos del sistema; (b) Implante completo.
- Fig. 126. (a) Gráfico tridimensional de relación potencia-resistencia-capacitancia; (b) Gráfico de la fuerza aplicada y de la tensión para la carga en el tiempo.
- Fig. 127. Circuito eléctrico del implante.
- Fig. 128. (a) Gráfico de la eficiencia electromecánica del piezoeléctrico frente a distintos valores de resistencia de carga y frecuencia; (b) resultados de fuerza aplicada, tensión regulada en la salida y los períodos de encendido y apagado del diodo led respecto al tiempo.
- Fig. 129. (a) Transmisor PTM100, alimentado con elementos piezoeléctricos; (b) Esquema en bloques del sistema.
- Fig. 130. Sistema transmisor del MIT.
- Fig. 131. Gráfico de tensión-tiempo desde la pulsación hasta el final de la transmisión.
- Fig. 132. Encendedor piezoeléctrico para cocinas de gas.
- Fig. 133. Dibujo del sistema.
- Fig. 134. Proceso de obtención de energía.
- Fig. 135. (a) Gráfico de tensión a la salida del piezoeléctrico; (b) Tensión rectificada medida en un condensador externo de 470 nF.
- Fig. 136. (a) Sistema generador con fotodiodo; (b) Salida de tensión en la salida del fotodiodo.



## **Lista de figuras y tablas.**

---

- Fig. 137. (a) Esquema eléctrico completo del sensor óptico autoalimentado; (b) Gráfico de tensión en la salida del oscilador controlado por un fotodiodo.
- Fig. 138. Sistema final miniaturizado.
- Fig. 139. Movimiento de un piezoeléctrico producido por una burbuja.
- Fig. 140. Dibujo del prototipo de la Universidad de Southampton.
- Fig. 141. (a) Gráfico de tensión en carga – amplitud de la placa; (b) Gráfico de potencia de salida- resistencia de carga para distintas amplitudes de la placa.
- Fig. 142. Configuraciones con varias masas para una mayor generación.
- Fig. 143. Diagrama de bloques del sistema y esquemático del circuito de descarga.
- Fig. 144. Regulador LTC1474 de Linear Technology.
- Fig. 145. Esquema eléctrico del conjunto.
- Fig. 146. (a) Gráfico potencia de salida - tensión en circuito abierto para diferentes ciclos de trabajo; (b) Gráfico de potencia – tensión en circuito abierto a diferentes configuraciones.
- Fig. 147. (a) Equivalente eléctrico del sistema; (b) Dibujo del piezoeléctrico.
- Fig. 148. (a) Gráfico de desplazamiento - frecuencia; (b) Gráfico de tensión en la carga - potencia desarrollada - valores de carga.
- Fig. 149. Fuente de energía externa para un corazón artificial.
- Fig. 150. Diagrama de bloques del sistema con transformador transcutáneo para un corazón artificial.
- Fig. 151. Esquema del sistema de rotores acoplados magnéticamente.
- Fig. 152. Sistema AbioCor, formado por 4 partes principales implantadas.
- Fig. 153. Ilustración del generador térmico  $\mu$ -TEG de Biophan Technologies.
- Fig. 154. Sistema de alimentación piezoeléctrico e isótopo radiactivo  $^{63}\text{Ni}$ .
- Fig. 155. Esquema de la célula de glucosa- oxígeno.
- Fig. 156. Características del piezoeléctrico de Piezo Systems.
- Fig. 157. Gráfica tensión pico a pico - frecuencia de entrada para la masa de 48,78g.
- Fig. 158. Gráfica tensión pico a pico - frecuencia de entrada para una masa de 87,87g.
- Fig. 159. Niveles de frecuencia para distintos grosores y materiales.
- Fig. 160. Circuito acondicionador y de carga- descarga del condensador.
- Fig. 161. Imagen del circuito electrónico.
- Fig. 162. Imagen de sistema completo.
- Fig. 163. Carga y descarga del condensador de 1  $\mu\text{F}$ .
- Fig. 164. Disposición de imanes alrededor de la bobina
- Fig. 165. Gráfica de tensión pico a pico respecto a la frecuencia de vibración.
- Fig. 166. Gráfica de tensión pico a pico respecto al valor de carga de salida.
- Fig. 167. Sistema magnético desarrollado.
- Fig. 168. Gráfica de tensión – iluminancia para el módulo solar.
- Fig. 169. Placa solar modelo YH6060-8A80 de Shinepower.

## **Tablas.**

Tabla 1. Estimación de energía para los tres métodos de conversión.

Tabla 2. Posibles fuentes con sus aceleraciones y frecuencias conseguidas [58].

Tabla 3. Estimación de energía para algunas actividades del cuerpo humano.

## **Lista de figuras y tablas.**

---

Tabla 4. Requerimientos de un sistema sensor y capacidad de algunas fuentes de energía.

Tabla 5. Dimensiones de la célula.

Tabla 6. Condiciones experimentales.

Tabla 7. Valores estimados y experimentales del aumento en el ratio de densidad de corriente entre microcanales hexagonales y cuadrados.

Tabla 8. Capacidad de energía en mWh de la batería variando sus parámetros.

Tabla 9. Tensiones obtenidas en función del tiempo y del valor de la carga.

Tabla 10. Comparativa de materiales piezoeléctricos de uso común.

Tabla 11. Energía eléctrica disponible en el cuerpo humano utilizando piezoeléctricos.

Tabla 12. Densidades de potencia estimada para cada tipo de microgenerador.

Tabla 13. Ventajas e inconvenientes para cada sistema.

Tabla 14. Aplicaciones varias para cada uno de los sistemas.

Tabla 15. Aplicaciones y requerimientos de potencia para algunos implantes médicos.

Tabla 16. Comparación de las diferentes tecnologías de baterías.

Tabla 17. (a) Tensiones de salida en función del ángulo de incidencia y (b) de la distancia.